Hélder António Ferreira Pereira Costa

Modelação Matemática de Sistemas Solares Térmicos

UNIVERSIDADE DE TRÁS-OS-MONTES E ALTO DOURO
VILA REAL, 2009

Este trabalho foi expressamente elaborado com vista à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Resumo

Este trabalho tende a focar a importância do desenvolvimento e utilização da energia solar como alternativa às fontes energéticas de origem não renovável. A utilização desta fonte de energia pode ser feita através da implementação de sistemas solares térmicos. Neste trabalho é feito um enquadramento às políticas europeias e nacionais, no que diz respeito a esta matéria, bem como, uma avaliação do potencial energético existente no nosso país.

É explicado o funcionamento dos sistemas solares térmicos, bem como quais os seus principais constituintes, tecnologia utilizada e aplicações. É feita uma avaliação dos métodos de dimensionamento existentes.

Com base no cálculo manual é desenvolvido um código computacional, capaz de dimensionar de uma forma rápida e expedita, sistemas desta natureza.

Assim, a realização deste trabalho irá contribuir para uma melhoria no processo de dimensionamento de sistemas solares térmicos, através da modelação matemática. O modelo em questão permitirá simular o funcionamento de sistemas solares térmicos, tendo em conta características do local, tipologia de utilização do sistema, perfil de consumo e os dados do colector solar, entre outros parâmetros. O desenvolvimento do modelo teve em conta os critérios descritos no Decreto-Lei 80/2006.

O modelo matemático foi implementado num código computacional, recorrendo à linguagem Visual Basic, o qual tem por base as equações matemáticas desenvolvidas neste mesmo trabalho. Estas equações permitem, o cálculo da fracção solar *f* (relação entre a energia fornecida pelo sol nos colectores e a energia necessária/carga térmica). A construção do código computacional está estruturada de modo a minimizar a intervenção do utilizador, ficando ao seu encargo a selecção e introdução de parâmetros específicos para cada situação de utilização.

Assim, com este trabalho, pretende-se contribuir para o correcto dimensionamento de sistemas solares térmicos, colocando à disposição de projectistas uma ferramenta que cumpra o estipulado no Decreto-Lei 80/2006 e que, ao mesmo

tempo, efectue uma avaliação indicadora da viabilidade económica de investimentos desta natureza.

Recorrendo a um software comercial e ao cálculo manual, foi realizada uma comparação de resultados de modo a validar o modelo matemático desenvolvido. Verificou-se que a diferença dos resultados obtida para o cálculo da fracção solar *f,* não ultrapassa os 3% quando comparada com o software comercial e os 6% em relação ao cálculo manual. Todos os outros parâmetros obtidos, VAL, TIR, tempo de retorno do investimento, Q_{Solar} (energia fornecida pelo sol), Q_{CT} (energia necessária) e as emissões de CO_2 evitadas, não apresentam diferenças substanciais, principalmente quando comparadas com os resultados obtidos pelo cálculo manual.

Abstract

This work tends to focus the importance of development and utilization of the solar energy as an alternative to the non renewable energetic sources. The utilization of this energy source can be made through the implementation of thermal solar systems. In this work a framework to the European and national politics is made, as well as, an evaluation of energetically potential, existing in our country.

Based on the manual calculation, is developed a computational code, which in a fast and expeditious way is capable of sizing thermal solar systems.

So, the realization of this work will contribute to a better sizing of solar energy systems, through a construction of a mathematic model. The created model, will permit simulate the function of thermal solar systems, taking into consideration, local features, utilization typology, consumption profile and solar collector data. The development of the model is based on the Law 80/2006.

The mathematic model was implemented in Visual Basic language, which is based on the mathematic model developed in this work. This model permits a calculation of solar fraction, *f*, (relation between energy given by sun through the collectors and the required energy). The code construction is structured to minimize the intervention of user, in this way; the user is responsible for the selection and introduction of specific parameters from all situation of utilization.

This work seeks to give a contribute to the correct sizing of thermal solar systems, by providing to the designers, a tool which meets the requirement in 80/2006 Law, and at the same time, take a evaluation of the economic viability of this type of investments.

Using the manual calculation process and a commercial software, was made a results comparison to validate the mathematical model developed. Thus, the difference to the calculation of solar fraction is not bigger than 3% when compared to the commercial software and 6% when compared to the manual calculation. All the others obtained parameters, VAL, TIR, *Payback,* Q_{Solar} (energy given by sun trough the collectors), Q_{CT} (required energy), and avoided CO_2 emissions, don't present substantial differences, mainly when compared to the results obtained through manual calculation.

Agradecimentos

Agradeço ao Prof. Amadeu Duarte da Silva Borges a confiança que depositou em mim, aceitando ter-me como seu orientando, as sugestões que dele recebi, bem como a disponibilidade que sempre manifestou na orientação deste trabalho.

A todos os meus familiares, amigos e colegas que me incentivaram e apoiaram na elaboração deste trabalho, manifesto também a minha gratidão.

Índice

Resumo i
Abstract iii
Agradecimentos iv
Nomenclatura x
1 Introdução 1
1.1 Objectivos 5
1.2 Conteúdo do trabalho 5
2 Energia Solar 7
2.1 Introdução 7
2.2 História 11
2.3 Enquadramento Legal 12
2.4 Transferência de Calor 14
2.5 Radiação Solar 17
3 Sistemas Solares Térmicos 25
3.1 Aproveitamento Solar Térmico 25
3.2 Colector Solar 28
3.3 Depósito/Permutador 30
3.4 Grupo de Circulação 30
3.5 Grupo de Controlo 31
3.6 Sistema de Apoio 31
3.7 Tipos de sistemas solares térmicos 32
3.8 Sistemas solar termodinâmicos 34
4 Modelo Matemático 37
4.1 Equações da fracção solar 37
4.2 Validação das equações desenvolvidas 46
4.3 Conclusões 48
5 Programa “SolarEnergy” 49
5.1 Introdução 49
5.2 Programa “SolarEnergy” 50
5.3 Conclusões 71
6 Casos de estudo 73

6.1 Apresentação dos Casos de Estudo 73
6.2 Caso de estudo 1 74
6.3 Caso de estudo 2 76
6.4 Caso de estudo 3 77
6.5 Caso de estudo 4 79
6.6 Caso de estudo 5 80
6.7 Conclusões 81
7 Conclusões e Trabalho Futuro 83
7.1 Conclusões 83
7.2 Trabalho Futuro 84

Lista de Figuras

Figura 1- Fornecimento mundial de energia primária 4
Figura 2- Fornecimento de energia primária dos países da OCDE 4
Figura 3- Capacidade total em operação 8
Figura 4- Quantidade de energia produzida por tipo de fonte 8
Figura 5- Total de capacidade instalada de colectores solares térmicos [MW_{th}], ... 9
Figura 6- Potencial solar em Portugal 10
Figura 7- Evolução anual da área instalada de solar térmico em Portugal 10
Figura 8- Total acumulado da área instalada de solar térmico em 2008 11
Figura 9- Pirelióforo 12
Figura 10- Mecanismos de transferências de calor num colector solar 14
Figura 11- Distribuição espectral da radiação solar 18
Figura 12- Distribuição percentual da radiação solar incidente 19
Figura 13- Níveis de radiação solar global anual na Europa 19
Figura 14- Variação da altura solar com a latitude 20
Figura 15- Orientação de painéis solares térmicos 22
Figura 16- Colectores planos 26
Figura 17- Colectores do tipo CPC 27
Figura 18- Colector Tubo de Vácuo 27
Figura 19- Colectores Cilindro-Parabólicos 28
Figura 20- Central de energia solar térmica 28
Figura 21- Esquema do funcionamento painel solar 29
Figura 22- Sistemas de termossifão 33
Figura 23- Sistema de circulação forçada 33
Figura 24- Sistema de circulação forçada para aquecimento de AQS 34
Figura 25- Representação esquemática do funcionamento de um sistema solar termodinâmico 35
Figura 26- Esquema do sistema de colectores solares assistidos por uma bomba de calor de funcionamento geotérmico 36
Figura 27- Factor de correcção da capacidade de acumulação (C_1) 39

Figura 28- Diagrama de blocos representativo do modelo matemático desenvolvido... 50
Figura 29- Esquema representativo da estrutura do programa desenvolvido..... 51
Figura 30- Imagem inicial do programa..... 52
Figura 31- Tipologia de utilização..... 53
Figura 32- Elementos do local..... 54
Figura 33- Carta solar 40ºN..... 55
Figura 34- Carta solar 40ºN com obstrução 56
Figura 35- Perfil de consumo 57
Figura 36- Perfil de consumo com mensagem de aviso 58
Figura 37- Tipo de sistema solar 59
Figura 38- Orientação da cobertura..... 60
Figura 39- Colector solar..... 61
Figura 40- Opção novo colector..... 62
Figura 41- Características do permutador 63
Figura 42- Características do depósito 64
Figura 43- Opção de novo depósito..... 65
Figura 44- Sistema de apoio energético 66
Figura 45- Resultados..... 67

Lista de Tabelas

Tabela 1- Inclinações típicas para colectores solares térmicos 21
Tabela 2- Factores de correcção 23
Tabela 3- Caso 1: Dados de entrada 47
Tabela 4- Caso 1: Resultados 47
Tabela 5- Caso 2: Dados de entrada 47
Tabela 6- Caso 2: Resultados 48
Tabela 7- Descrição dos casos de estudo 74
Tabela 8- Dados de entrada para o caso de estudo 1 75
Tabela 9- Resultados caso de estudo 1 75
Tabela 10- Dados de entrada para o caso de estudo 2 76
Tabela 11- Resultados *caso 2* 77
Tabela 12- Dados *caso 3* 78
Tabela 13- Resultados *caso 3* 78
Tabela 14- Dados *caso 4* 79
Tabela 15- Resultados *caso 4* 80
Tabela 16- Dados *caso 5* 80
Tabela 17- Resultados *caso 5* 81

Nomenclatura

Caracteres romanos

A	Área de colectores solares
C	Custos do projecto
f	Fracção Solar
G_d	Radiação Difusa
G_D	Radiação Directa
G_G	Radiação Global
G_{ON}	Radiação incidente numa superfície perpendicular aos raios solares
G_{SC}	Radiação solar que chega a atmosfera
h	Coeficiente de convecção
$\bar{I}$	Radiação Média
K	Condutibilidade térmica
ND	Número de dias
NH	Número de habitantes
$\dot{Q}_{conv}$	Taxa de calor transferido por convecção
$\dot{Q}_{ct}$	Carga Térmica
$\dot{Q}_{solar}$	Energia fornecida pelo Sol
$\dot{Q}_x$	Taxa de condução de calor
R	Receitas do projecto
$\bar{T}_{amb}$	Temperatura média ambiente
T_{rede}	Temperatura da água da rede
T_{utiliz}	Temperatura de utilização da água quente
V_{cons}	Volume de água consumido por habitante por dia
Z	Volume do reservatório

Caracteres gregos

α	Azimute solar
β	Ângulo entre o colector e o plano horizontal
η_0	Rendimento óptico do colector solar
θ_Z	Ângulo formado entre a radiação e a vertical do lugar

Abreviaturas

ADENE	Agência para a energia
AQS	Águas quentes sanitárias
CCP	Colector cilindro-parabólicos
CPC	Colector parabólicos concentradores
CTV	Colector tubo de vácuo
GEE	Gases de efeito de estufa
PNAC	Plano Nacional de alterações climáticas
PNAEE	Plano Nacional de acção para a eficiência energética
PNALE	Plano Nacional de atribuições de licenças de emissão
RCCTE	Regulamento das características de comportamento térmico de edifícios
TIR	Taxa interna de rentabilidade
VAL	Valor actualizado liquido

Capítulo 1

Introdução

No actual contexto sócio-económico, é cada vez mais frequente sermos confrontados com situações restritivas no que diz respeito ao consumo de energia proveniente de fontes não renováveis.

Actualmente quando se pensa no sector energético, ou em qualquer forma de energia, temos obrigatoriamente de fazer a associação com o meio ambiente. Cada vez mais, existe a necessidade de pensar em meio ambiente e energia como um todo, de modo a minimizar os efeitos negativos associados á produção e utilização de qualquer forma de energia. Deste modo, deve assumir-se a energia e o meio ambiente como parceiros e não como concorrentes.

Existem diversas fontes de energia renovável no nosso planeta, tais como a Solar, Eólica, Biomassa e Geotérmica, entre outras, através das quais é possível fazer um aproveitamento energético rentável com um baixo nível de emissão de gases com efeito de estufa.

Todas estas fontes têm um elevado potencial energético, pelo que é nosso dever, desenvolvermos novas tecnologias, métodos de cálculo e de dimensionamento de sistemas, que possibilitem fazer o correcto aproveitamento dessa energia. O presente trabalho, tem como objectivo dar resposta, na área da energia solar térmica, ao cálculo e dimensionamento de sistemas capazes de fazer o aproveitamento da energia solar térmica.

Hoje em dia, existem muitas maneiras de fazer o aproveitamento da energia solar, uma delas pode ser a descrita por C.A. Estrada et al. (2007), que consiste na utilização de concentradores, isto é, utilizar vários espelhos que

concentrem/redireccionem os raios solares num único ponto e daí extrair a energia resultante. Deste modo, consegue-se obter temperaturas muito superiores às que são obtidas num sistema convencional, o que se revela de extrema importância quando o objectivo é elevar a temperatura de um fluído o mais possível (estado de vapor). Este método é utilizado para centrais solares térmicas para produção de energia eléctrica.

Um dos grandes problemas dos painéis solares térmicos é o facto de necessitarem de uma projecção directa da radiação solar. De modo a contornar tal situação, Teolan Tomson (2008), expõe a possibilidade e as vantagens da monitorização da inclinação e rotação dos painéis solares, de modo a que estes tenham um maior período de exposição solar. Através da aplicação de dispositivos "seguidores" do sol e através de uma plataforma móvel, consegue fazer-se o acompanhamento do movimento relativo do sol com os painéis solares. Deste modo, segundo Teolan Tomson (2008), consegue maximizar-se o desempenho do colector solar, podendo o ganho de energia compensar largamente o custo do equipamento.

Assim sendo, tem sido elaborado um trabalho a nível mundial que visa um aumento da eficiência energética, assim como direccionar o consumo para energias provenientes de fontes renováveis. Deste modo, têm sido tomadas diversas medidas por todo o mundo. A nível europeu, foi assinado pelos estados membros o protocolo de Quioto, no qual os estados membros se comprometeram a reduzir em 8% as emissões de gases de efeito de estufa (GEE), relativamente ao ano base de 1990. Mais concretamente no caso de Portugal, este assumiu o compromisso de não ultrapassar em mais de 27% as emissões de GEE relativas ao ano de 1990.

Desde este acordo, têm sido feitos esforços tendo em vista o seu cumprimento. Deste modo, foram criados diversos programas tais como o PNAC (Plano Nacional para as Alterações Climáticas), PNAEE (Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética), PNALE (Plano Nacional de Atribuições de Licenças de Emissão). Todos estes programas definem metas, medidas e incentivos tendo em vista o cumprimento do referido protocolo.

Mais recentemente, a União Europeia comprometeu-se em reduzir até 2020, 20% do seu consumo de combustível de origem fóssil face ao ano de 1990. Para tal a União Europeia define o aumento em 20% da eficiência energética, o aumento da fracção das energias renováveis a 20% até à mesma data e ainda munir as novas centrais

de produção de energia com sistemas de captura do dióxido de carbono e captura de outros gases.

Para além do impacto ambiental, o crescente custo dos combustíveis foceis e o facto de mais de metade das reservas mundiais de petróleo estarem localizadas no Médio Oriente, facto este que provoca uma extrema dependência mundial destes países, torna necessário o desenvolvimento de equipamentos e métodos que nos permitam utilizar as fontes de energia renováveis de que dispomos.

Podemos definir como sendo energia renovável, toda aquela que, o seu ritmo de consumo é inferior ao ritmo da sua geração à escala humana, ou seja, a fonte de energia é utilizada, mas tem a capacidade de se regenerar num período de tempo muito reduzido, o que faz com que esta seja praticamente inesgotável. Desta forma, são consideradas fontes de energia renováveis, o sol, o vento, a mini-hídrica, a biomassa, a das ondas e das marés e a geotérmica.

A energia solar revela-se uma das formas de energia renováveis mais importantes que existe, uma vez que quase todas as outras formas de energia como por exemplo a energia dos oceanos, biomassa, eólica, e combustíveis fosseis, são formas indirectas da energia solar. A energia solar pode ser transformada em dois principais tipos: Energia Solar Térmica e Energia Solar Eléctrica. A Energia Solar Térmica tem como aplicações o aquecimento de águas quentes sanitárias no sector público e residencial, bem como fazer o aquecimento ambiente e de piscinas, entre outros. Para o efeito são utilizados colectores solares. A este subgrupo pertence também a energia solar passiva, que consiste na aplicação de modelos de construção de edifícios, capazes de por si só realizar o aquecimento do próprio edifício. A Energia Solar quando aproveitada através de módulos fotoeléctricos pode ser designada por fotovoltaica e é utilizada para fornecimento à rede eléctrica, uso doméstico, assim como revela-se uma solução capaz de fazer o abastecimento de electricidade em locais remotos. Para o aproveitamento deste tipo de energia utilizam-se os painéis fotovoltaicos.

Nos dias de hoje, segundo a ADENE (Agência para a energia), a maior parte da energia consumida em todo o mundo é proveniente de fontes não renováveis. A Figura 1, mostra a distribuição do fornecimento total mundial por tipo de energia referente ao ano de 2006 com um total de 11741 *Mtep*, através do qual é possível verificar que mais de 85% deste valor é de origem não renovável.

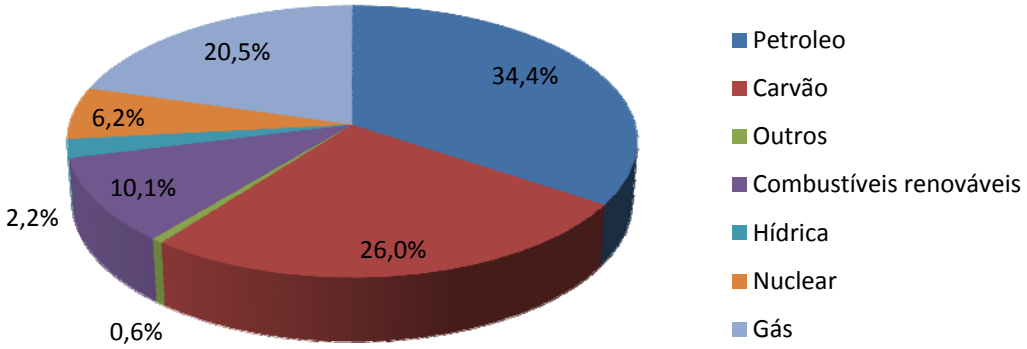

Figura 1- Fornecimento mundial de energia primária, ano 2006

No caso dos países da OCDE (entre os quais Portugal), o fornecimento de energia primária perfaz um total de 5590*Mtep*. Nestes países, o panorama não sofre uma alteração positiva. Como se pode verificar pela Figura 2, o fornecimento de energia primária proveniente de fontes não renováveis, referente ao ano de 2007 é sensivelmente de 90%.

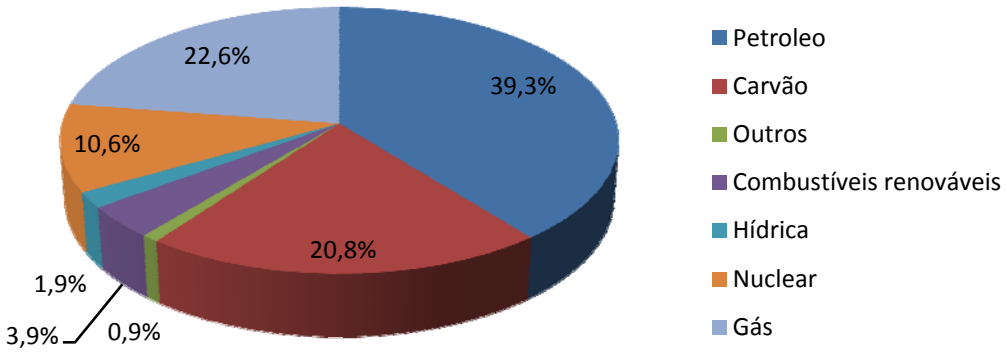

Figura 2- Fornecimento de energia primária dos países da OCDE, ano 2007

1.1 Objectivos

Com a elaboração deste trabalho pretende-se colmatar a falta de metodologia de cálculo, dimensionamento e avaliação dos sistemas solares térmicos, em concreto para aplicações no sector doméstico de produção de águas quentes sanitárias. O presente trabalho divide-se em duas áreas. Numa primeira etapa será desenvolvido o modelo matemático que permite o cálculo de um dos parâmetros mais importantes do dimensionamento de um sistema solar térmico, designado por fracção solar, *f*. Numa segunda fase, o modelo matemático desenvolvido é implementado num código computacional que pretende ser uma importante ferramenta de trabalho no dimensionamento deste tipo de sistemas. Através deste programa serão determinados parâmetros relativos ao desempenho, viabilidade económica e impacto ambiental proporcionados pela utilização de um sistema solar térmico.

1.2 Conteúdo do trabalho

O presente trabalho divide-se em sete capítulos, incluindo este, de introdução, e o último, em que se apresentam as conclusões principais do trabalho e algumas propostas de trabalho futuro.

No capítulo 2 é descrita a importância da energia solar como alternativa às actuais fontes de energia não renováveis. É feita uma avaliação do potencial desta fonte no nosso país e quais as políticas nacionais/europeias que regulamentam este assunto. São apresentados os diversos métodos de transferência de calor e como ocorrem no interior de um colector solar. Também é feita uma descrição da radiação solar e a sua interacção com o nosso planeta.

No capítulo 3 é explicado o funcionamento de um sistema solar térmico, quais os equipamentos que fazem parte de um sistema desta natureza e o seu modo de funcionamento. São ainda apresentados os diversos tipos de sistemas solares térmicos existentes no mercado, bem como é apresentada a tecnologia dos sistemas solares termodinâmicos.

O capítulo 4 apresenta o modelo matemático desenvolvido e ainda a sua validação através da comparação dos resultados obtidos, através do modelo matemático, com valores obtidos por outros métodos de cálculo.

No capítulo 5 são expostas as particularidades do código computacional desenvolvido e no qual foi implementado o modelo matemático. São apresentadas as vantagens de utilização do código, bem como deve ser interpretado pelo utilizador.

No capítulo 6 são apresentados os casos de estudo que foram analisados, tendo em vista fazer a avaliação de desempenho do código computacional desenvolvido. Procurou-se também, analisar o grau de influência de determinados factores (número de habitantes do imóvel ou o número de metros quadrados de colectores instalados), no funcionamento e viabilidade económica dos sistemas solares térmicos. Foram comparados os valores obtidos através do código computacional com valores obtidos por outras metodologias de cálculo.

Capítulo 2

Energia Solar

Conteúdo do capítulo

Neste capítulo pretende-se demonstrar o potencial da energia solar, bem como a sua dimensão por todo o mundo relativamente às restantes fontes de energia. É feito um enquadramento das políticas energéticas mundiais e dos planos adoptados. Faz-se a exposição da origem do aproveitamento da energia solar, assim como a descrição dos processos de transferência de calor que ocorrem num colector solar.

2.1 Introdução

O sol fornece de forma gratuita uma enorme quantidade de energia renovável. A radiação solar incide na terra a uma taxa de sensivelmente $8\times10^{16}W$, isto é mais do que 10000 vezes o consumo mundial de energia (Rabl, Ari, 1985). Nas Figuras 3 e 4, pode observar-se a relação entre a capacidade total mundial em operação, e a energia produzida por cada tipo de fonte renovável.

É possível verificar, pela análise das Figuras 3 e 4, que o total da capacidade instalada associada de Solar Térmico para produção de calor, é superior ao total instalado de todas as outras fontes juntas. Este facto não se traduz em uma supremacia do Solar Térmico no que diz respeito à quantidade de energia produzida, uma vez que este tipo de fonte tem a condicionante das horas solares diárias disponíveis.

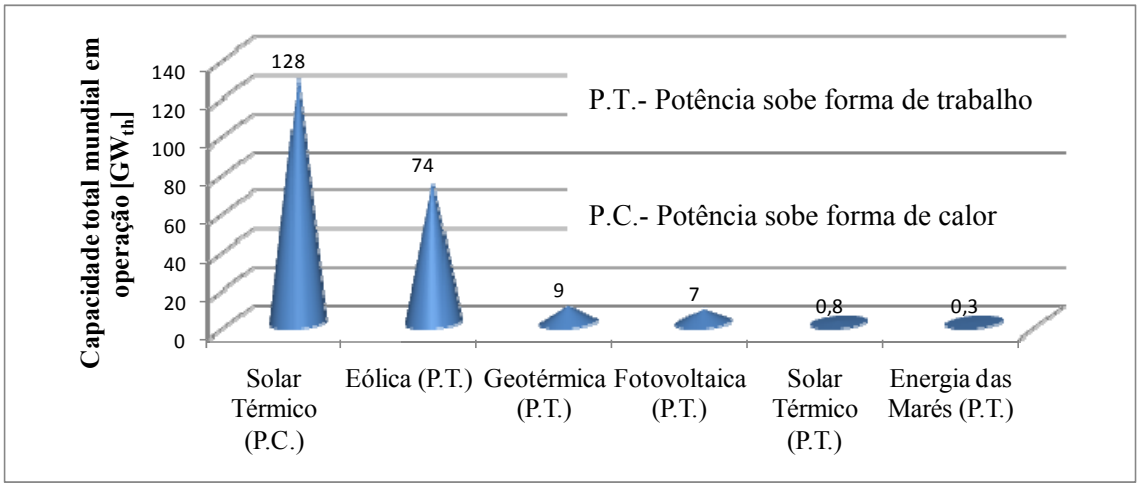

Figura 3- Capacidade total em operação, ano 2006

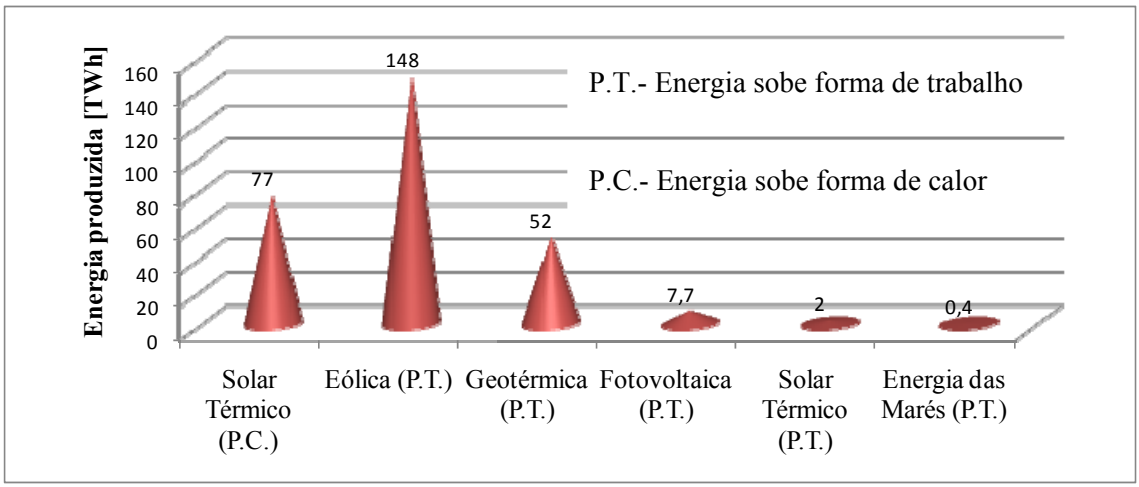

Figura 4- Quantidade de energia produzida por tipo de fonte, ano2006

Deste modo pode verificar-se que até ao final do ano de 2006 a capacidade total instalada de Solar Térmico era de sensivelmente $128GW_{th}$, o que corresponde a um total de 182,5 milhões de metros quadrados de área de colectores. Estes dados são referentes a 48 países que por sua vez representam 85 a 90% do Solar Térmico existente em todo o mundo, dados I.E.A (International Energy Agency).

A energia solar para além de ser uma das fontes de energia renovável mais abundante em todo o mundo, tem a grande vantagem de poder ser aproveitada junto de onde vai ser consumida, deste modo eliminam-se perdas associadas à distribuição, o que é impraticável com outro tipo de fontes de energia. Na Figura 5, apresenta-se a distribuição da capacidade total em operação de colectores solares térmicos por país

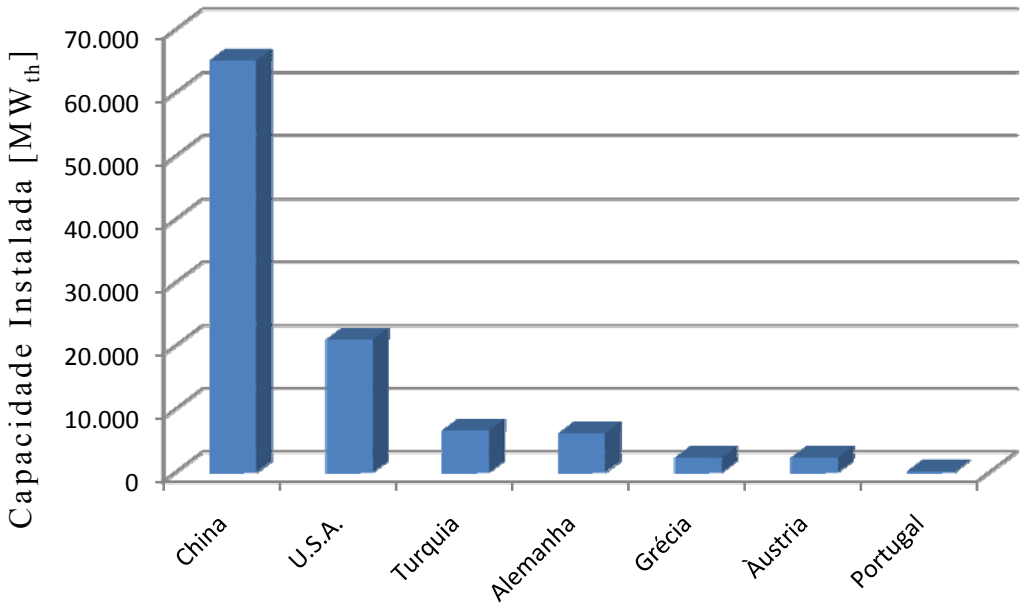

Figura 5- Total de capacidade instalada de colectores solares térmicos [MW_{th}], ano 2006

A China, os Estados Unidos da América e a Turquia são líderes mundiais na capacidade instalada de colectores solares térmicos e a Alemanha, Grécia e Áustria são líderes a nível Europeu.

É possível verificar pela análise da Figura 5, a discrepância existente entre os dados de Portugal e os dos restantes países. No caso da Alemanha, esta tem 6162,80 MW_{th} instalados contra os 169,82 MW_{th} instalados no nosso país. Portugal é um dos países da União Europeia com mais horas de sol por ano (2200 a 3000 horas), Figura 6, que se traduz em termos energéticos em *14* a 17 MJ/m^2. Apesar deste facto, Portugal fica atrás de países como a Alemanha que dispõe de um número de horas solares substancialmente menor (1200 a 1700 horas).

Contudo na Figura 7, podemos ver a evolução anual da área em metros quadrados de colectores solares térmicos instalados, registada em Portugal

No ano de 2008 verifica-se uma taxa de crescimento superior a 70%, e comparativamente com o ano de 2006 o mercado triplica. Estes resultados, são em parte fruto de novas necessidades regulamentares, as quais conduziram à introdução do novo RCCTE (Regulamento das características de comportamento térmico de edifícios), que por sua vez teve um papel potenciador do mercado

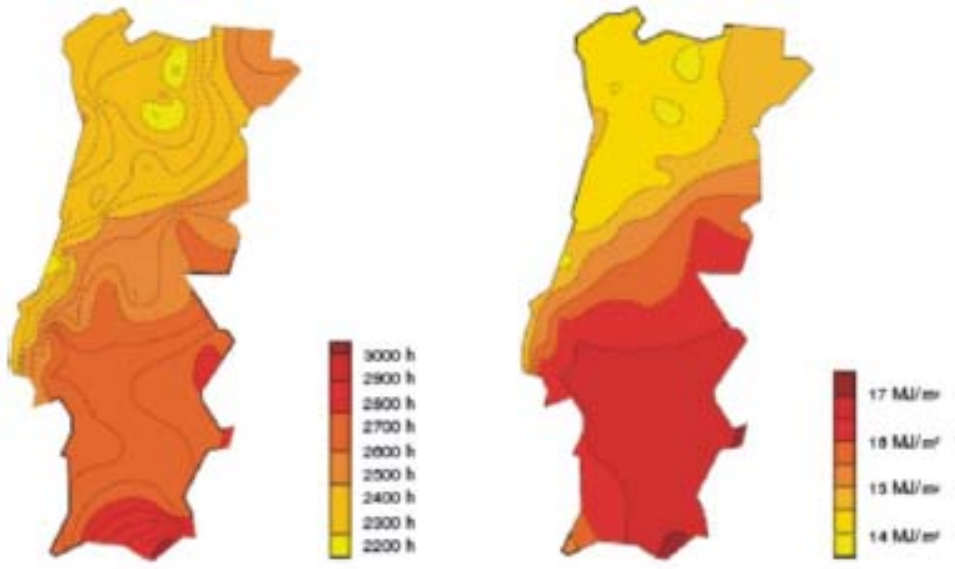

Figura 6- Potencial solar em Portugal, PVGIS © European Communities, 2002-2005

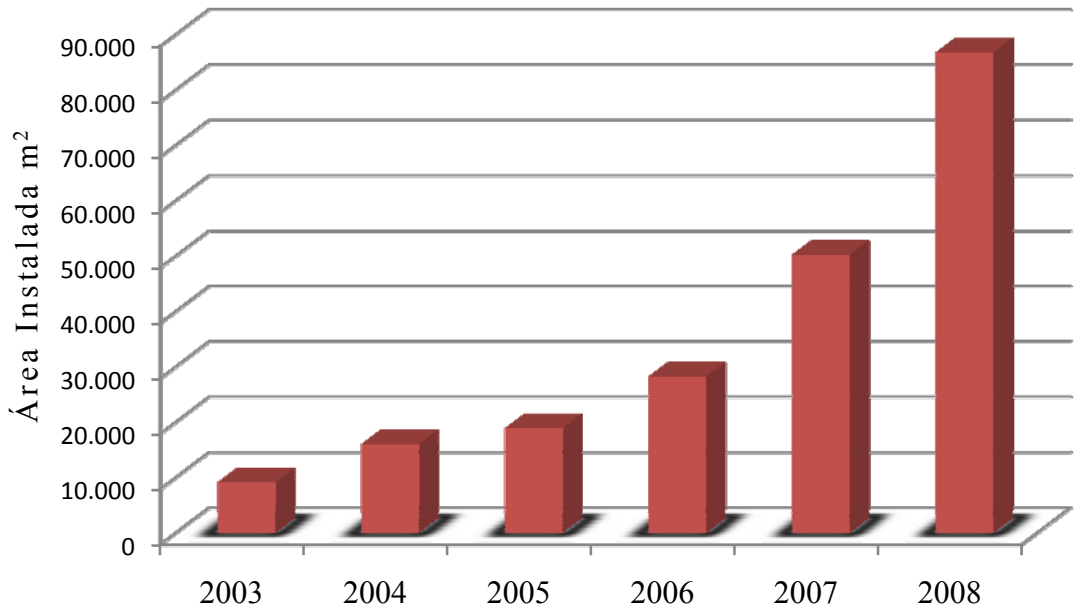

Figura 7- Evolução anual da área instalada de solar térmico em Portugal, (ADENE,2009)

. Na Figura 8, é apresentado o total acumulado da área instalada no ano de 2008. A área instalada operacional face ao ano de 2002 aumentou em mais de 115%. Actualmente, a capacidade operacional de solar térmico ronda os 390.000m^2 de área segundo dados da ADENE (Agência para a Energia).

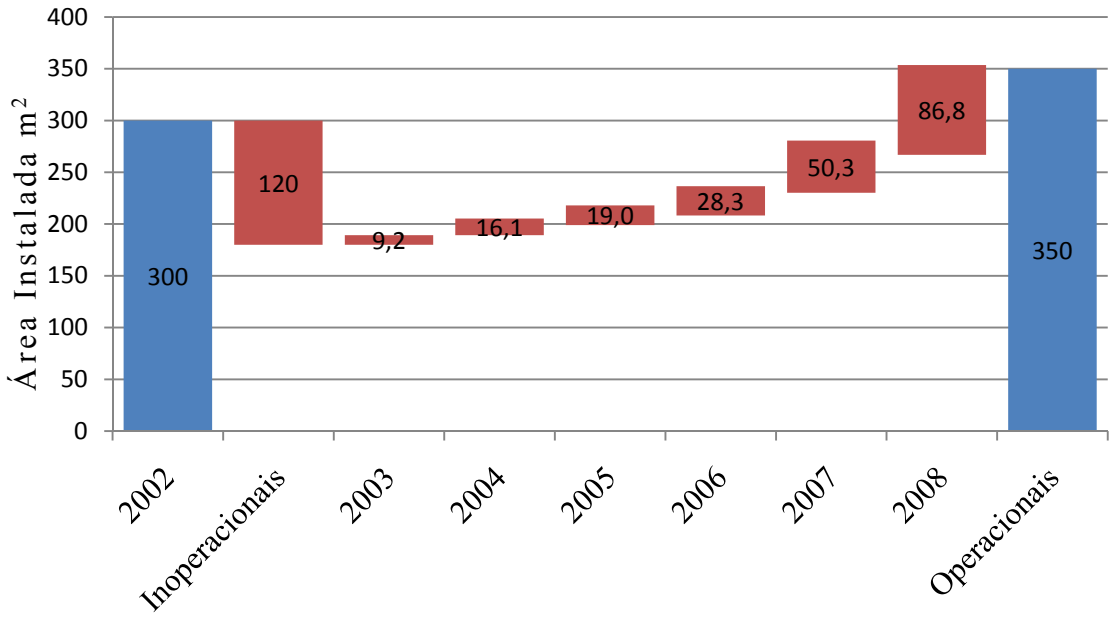

Figura 8- Total acumulado da área instalada de solar térmico em 2008, (ADENE,2009)

2.2 História

A vontade de fazer uso da radiação solar que chega à superfície terrestre como fonte de energia térmica não é de modo nenhum uma novidade.

No século passado, um português de nome Padre Manuel António Gomes, mais conhecido por Padre Himalaya, desenvolveu e construiu um avançado sistema de captação da energia solar denominado por Pirelióforo (*latim: portador do fogo do sol*), Figura 9. O equipamento consistia num espelho parabólico com $80m^2$, que era constituído por 6177 pequenos espelhos, os quais reflectiam a radiação solar para uma cápsula refractária (cadinho), onde se colocavam os materiais a fundir. No interior do cadinho atingiam-se temperaturas na ordem dos $3500ºC$. Este feito foi galardoado em 1904 na exposição de St. Louis nos Estados Unidos com duas medalhas de ouro e uma de prata.

Contudo a utilização corrente da radiação solar para aquecimento de águas quentes sanitárias, só veio acontecer nos anos 80, após o segundo choque petrolífero em 1979 decorrente da revolução iraniana, embora não tenha tido a amplitude desejada, uma vez que os equipamentos e a qualidade de instalação eram muito ténues.

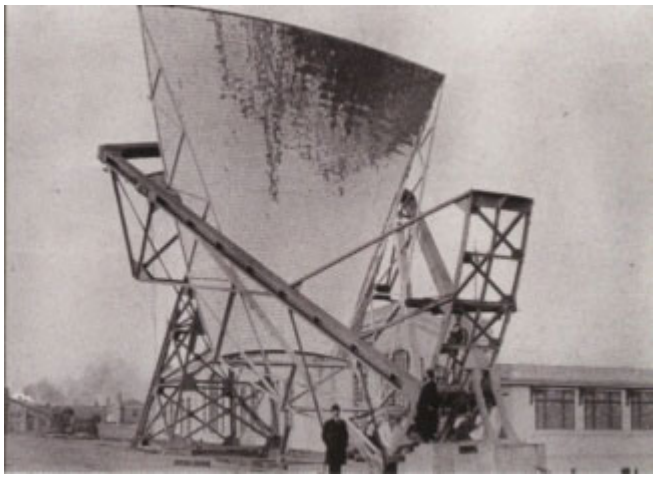

Figura 9- Pirelióforo, (Inquilino do Seminário de Vilar, Cordeiro, José Manuel Lopes,7 de Maio de 2000)

2.3 Enquadramento Legal

Os diversos programas desenvolvidos (PNAC, PNALE e PNAEE), visam medidas concretas e até mesmo de carácter obrigatório, de modo a atingir as metas em que Portugal se comprometeu quer a nível europeu, entre os quais, Protocolo de Quioto quer a nível mundial. Estes planos vão de encontro a uma filosofia ambientalista transversal a toda a Europa que tem como objectivo a sensibilização da população para a redução da emissão de gases com efeito de estufa, racionalização da energia e desenvolvimento e implementação de sistemas que contribuam para estas alterações.

Deste modo, está contemplado no PNAC a medida MRe4, a qual é designada por Programa Água Quente Solar para Portugal, e tem como meta a instalação em 2005-2006, 13.000m^2, e em 2007-2020, instalação de 100.000m^2/ano.

No âmbito do PNAEE, está contemplado o programa "Renove - Solar Térmico", o qual dá apoio à revitalização de equipamentos de solar térmico existentes, bem como o "Programa de incentivos para instalação de novo solar térmico". Este permite um benefício fiscal até 30% do investimento em sede de IRS, como estipulado no artigo 85º, Encargos com Imóveis e Equipamentos Novos de Energias Renováveis, do Código do IRS de 2008: "São dedutíveis à colecta 30% das importâncias dispendidas com a aquisição de equipamentos novos para a utilização de energias renováveis e de equipamentos novos para utilização de energia eléctrica e/ou térmica (co-geração) por microturbinas, com potência até 100kW, que consumam gás natural, incluindo

equipamentos complementares indispensáveis ao seu funcionamento, com o limite de 777,00 euros."

Estes incentivos têm como objectivo fomentar a implementação deste tipo de sistemas, bem como possibilitar a obrigatoriedade criada pelo governo. Esta obrigatoriedade está descrita no Decreto-Lei 80/2006, de 4 de Abril, no capitulo III artigo 7º, segundo o qual: "O recurso a sistemas de colectores solares térmicos para aquecimento de água sanitária nos edifícios abrangidos pelo RCCTE é obrigatório sempre que haja uma exposição solar adequada, na base de $1m^2$ de colector por ocupante convencional previsto". Esta regra está: "conforme definido na metodologia de cálculo das necessidades nominais de energia para aquecimento de água sanitária referida no artigo 11º, podendo este valor ser reduzido por forma, a não ultrapassar 50% da área de cobertura total disponível, em terraço ou nas vertentes orientadas no quadrante Sul, entre Sudeste e Sudoeste". Também o Decreto-Lei 79/2006, Regulamento dos Sistemas Energéticos de climatização em Edifícios, vem "definir as condições de conforto térmico e higiene que devem ser requeridas nos diferentes espaços dos edifícios", bem como, "melhorar a eficiência energética global dos edifícios", "impor regras de eficiência aos sistemas de climatização", "Monitorizar com regularidade as práticas de manutenção dos sistemas de climatização". Por sua vez, o Decreto-Lei 78/2006, Sistema Nacional de certificação Energética (SCE), estipula as condições e regras de cálculo para a obtenção da certificação energética de um edifício. Neste momento estão definidas as regras e criadas as condições de obrigatoriedade para este tipo de sistemas, bem como toda a parte de incentivos à sua instalação e utilização.

Um outro aspecto importante nesta matéria é a certificação dos sistemas solares. Portugal tem o segundo maior dos cinco centros certificadores de sistemas solares da União Europeia. Apenas os sistemas solares certificados conseguem fazer parte da lista daqueles que entram no sistema de financiamento desenvolvido pelo Estado Português.

Assim constatamos que o conceito de utilização de painéis solares térmicos passou a ter um carácter de obrigatoriedade, para além de ser um modo de aproveitamento energético ecológico, simples e inteligente.

Deste modo, tem todo o interesse o estudo efectuado nesta matéria, tendo em vista dar uma resposta mais consciente e exacta do seu funcionamento e aplicação.

2.4 Transferência de Calor

Sempre que existe uma diferença de temperatura entre dois meios distintos, ocorre necessariamente transferência de calor, (Cengel, Yunus,A.2002). A transferência de calor ocorre sempre do meio com maior temperatura, para o meio com menor temperatura. Pode definir-se transferência de calor como sendo a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura (Cengel, Yunus,A.2002). Num colector solar podem coexistir três tipos de processos de transferência de calor, os quais estão representados na Figura 10:

- Condução
- Convecção
- Radiação

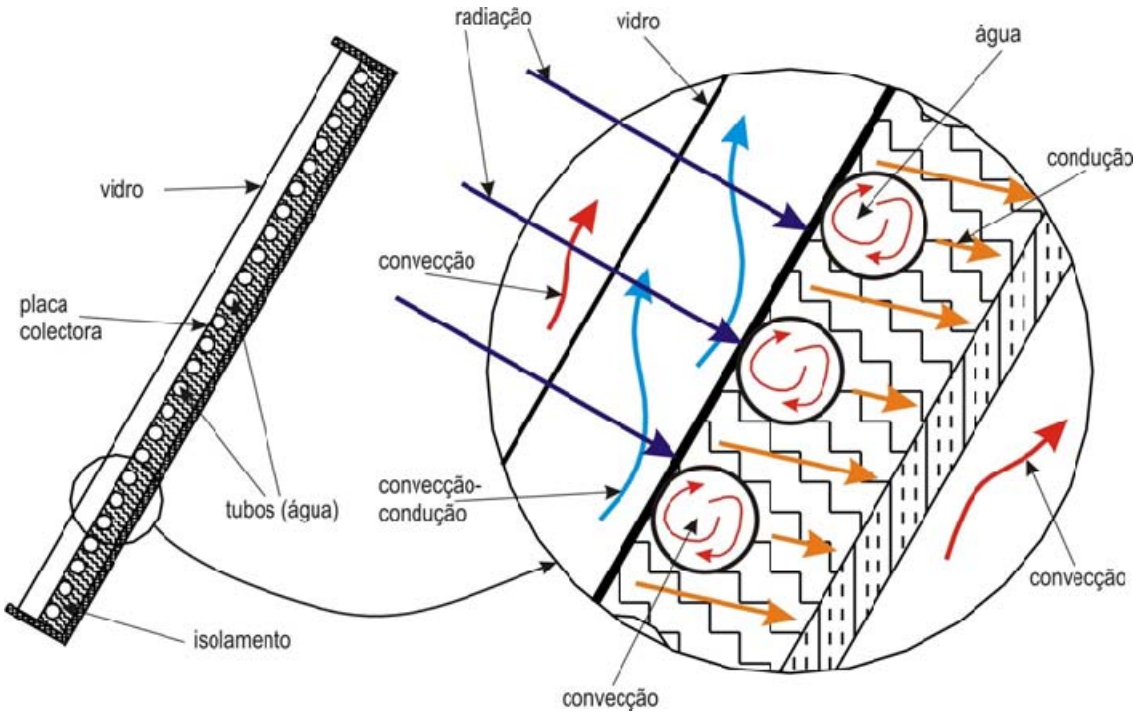

Figura 10- Mecanismos de transferências de calor num colector solar, (A. Borges, 2009)

Condução

Entende-se por Condução o mecanismo de transferência de calor, que ocorre num meio estacionário, sólido ou fluído. Esta transferência de calor ocorre a nível molecular, isto é, das partículas com maior energia para as de menor energia através do seu contacto directo. As partículas com temperaturas mais elevadas têm um maior movimento cinético dos seus átomos e moléculas, deste modo, colidem com as partículas de menor energia cinética (menor temperatura), ocorrendo assim a transferência de calor. A condutividade (capacidade de conduzir o calor) varia consideravelmente consoante o estado da substância em causa. Por norma, os sólidos são melhores condutores do que os líquidos e os líquidos são melhores condutores do que os gases. Para a avaliação das trocas de calor existentes na atmosfera Terrestre, a condução é a menos significativa.

A taxa de condução de calor ou simplesmente fluxo de calor, é determinada pela lei de Fourier e baseia-se nos princípios de que o fluxo de calor é:

- Directamente proporcional à diferença de temperaturas;

$$\dot{Q}_x \propto \frac{1}{\Delta T} \tag{2.1}$$

- Directamente proporcional à área de transferência de calor;

$$\dot{Q}_x \propto A \tag{2.2}$$

- Inversamente proporcional à distância dos pontos de leitura das temperaturas;

$$\dot{Q}_x \propto \frac{1}{\Delta x} \tag{2.3}$$

Resultando assim a equação de Fourier:

$$0 = -I + \left(R - C\right) \times \left[\frac{\left(1 + TIR\right)^{n-1}}{TIR \times \left(1 + TIR\right)^{n}} \right] \tag{2.4}$$

em que *K* é a condutibilidade térmica, a qual traduz a dependência do fluxo de calor em relação ao meio que atravessa.

Num colector solar os espaços de ar existentes são de extrema importância uma vez que ditam o tipo de transferência de calor que ocorre no seu seio. A taxa de transferência de calor por convecção é superior a que ocorre através da condução, pelo que se deve favorecer este último tipo de transferência de calor. Para isso é necessário reduzir os espaços de ar existentes no interior do colector, uma vez que num espaço estreito, a transferência de calor ocorre por condução. Conseguimos assim reduzir as perdas de calor para o meio ambiente.

Convecção

A convecção é um processo de transferência de calor que apenas ocorre entre líquidos e gases. Este processo refere-se à transferência de calor entre uma superfície e um fluído em movimento sempre que ambos se encontrem a temperaturas distintas. A troca de calor é resultante do movimento aleatório molecular designado por difusão, mas também do movimento global/macroscópico do fluído (Cengel, Yunus,A, .2002). A convecção tem na base do seu funcionamento o princípio da densidade de um líquido ou um gás. Em contacto com uma superfície relativamente quente o líquido ou o gás torna-se mais quente e por conseguinte a sua densidade diminui. Assim com a diminuição da densidade, estes têm tendência a deslocar-se para níveis superiores e são repostos por outros de densidade superior e por conseguinte mais frios. Deste modo volta a iniciar-se o ciclo de convecção. Num colector solar existem várias zonas onde ocorre este tipo de transferência de calor, entre as quais através do ar entre o vidro/cobertura e a placa absorvente, no interior dos tubos por onde circula o fluído de aquecimento e ainda na parte inferior do colector solar. Destas três zonas a única que é benéfica para o seu funcionamento é a que ocorre no fluído de aquecimento, todas as restantes devem ser eliminadas através da aplicação de isolamentos (lã de vidro ou poliuretano expandido) ou ainda reduzindo a espessura da caixa-de-ar.

Por último, importa referir que se o fluído se desloca na vertical então o processo designa-se por convecção. Se o fluído tem um movimento horizontal, o processo

designa-se por advecção. A troca de calor por convecção pode ser quantificada através da seguinte equação:

$$Q_{conv} = h \times A_s \times (T_s - T_\infty) \tag{2.5}$$

onde h é o coeficiente de convecção, A_s é a área de superfície, T_s é a temperatura da superfície e $T\infty$ é a temperatura do meio envolvente.

Radiação

A Radiação consiste na troca de calor através de ondas electromagnéticas. Toda e qualquer matéria emite energia sob a forma de ondas electromagnéticas. Esta energia é resultante da mudança nas configurações dos electrões que constituem os átomos ou moléculas. Este processo será explicado com mais detalhe no sub-capítulo da radiação solar. Contudo o valor do calor transferido entre dois corpos pode ser expresso por:

$$\dot{Q}_{1\to 2} = A_1 \times F_{1\to 2} \times \sigma \times (T_1^4 - T_2^4) \tag{2.6}$$

onde σ é a constante de Stefan-Boltzman ($5{,}67\times10^{-8} W/(m^2.)$), $F_{1\to 2}$ é o factor de forma entre o emissor e o receptor, A é a área do emissor e T são temperaturas absolutas.

A radiação é o mecanismo de transferência de calor que permite o ganho de calor do colector solar. É esta que dita a quantidade de calor que o colector absorve. A importância deste mecanismo de transferência de calor no funcionamento de um colector solar é explicada em detalhe no ponto seguinte.

2.5 Radiação Solar

O sol é uma fonte de radiação aproximadamente esférica que tem $1{,}39\times10^{9} m$ de diâmetro e está localizado a sensivelmente $1{,}5\times10^{11} m$ do planeta Terra (Transferência

de calor e de Massa, Incropera, et all,2002). É a estrela central do nosso sistema solar com uma massa de $1,2\times10^{3}\,kg$ e estima-se que a sua temperatura à superfície seja de $5775K$. O processo de Radiação ocorre sob a forma de ondas electromagnéticas. Este facto faz com que, ao contrário da Condução e Convecção, a Radiação térmica não dependa do meio envolvente, sendo possível o transporte de energia em vácuo. A radiação solar tem uma distribuição espectral conforme representada na Figura 11, com uma gama de comprimento de onda que varia entre os valores de 0,2 μm e os 3 μm.

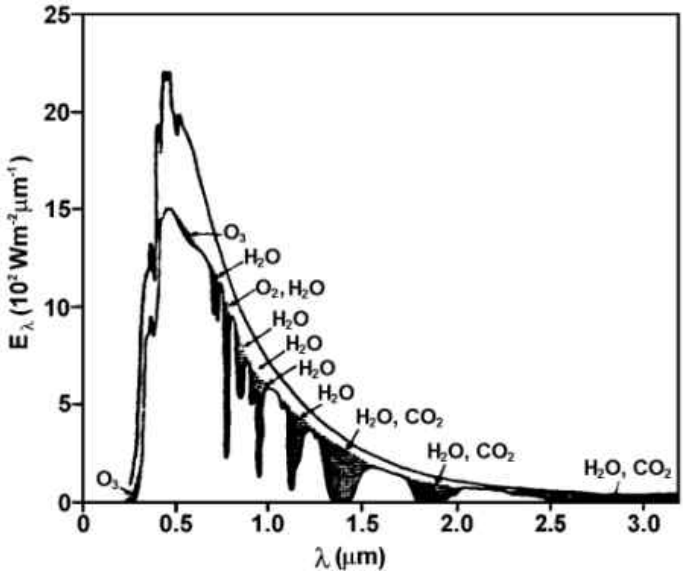

Figura 11- Distribuição espectral da radiação solar, (A. Borges, 2009)

De toda a radiação solar incidente no topo da atmosfera, Figura 12, apenas cerca de 47% chega à superfície da Terra, 34% é reflectida para o espaço e 19% é absorvida pela atmosfera. Da radiação que chega à Terra, muita é filtrada pela atmosfera. Esta filtragem varia consoante o comprimento de onda, referente aos constituintes da atmosfera, entre os quais o oxigénio, azoto, vapor de água e o CO_2. A atmosfera provoca a difracção dos raios solares. Este fenómeno origina a que mesmo num dia de céu nublado, haja sempre radiação a chegar à superfície terrestre. Assim a radiação incidente ou radiação global, subdivide-se em radiação directa e radiação difusa. Entende-se por radiação directa aquela que chega em raios paralelos directamente do sol. A radiação difusa é a dispersa pelas nuvens e outras partículas contidas na atmosfera.

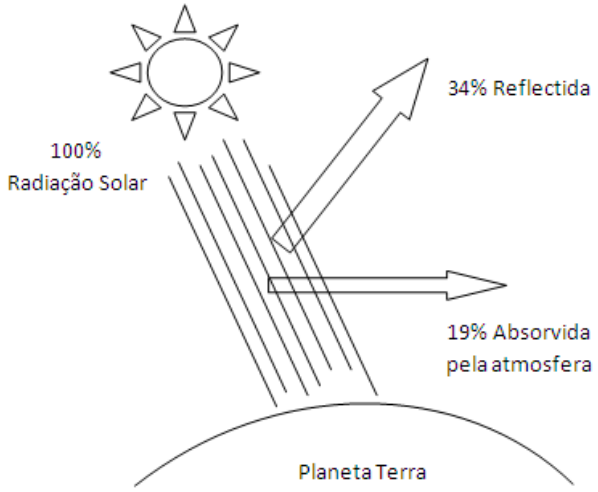

Figura 12- Distribuição percentual da radiação solar incidente

A quantidade de energia que cada local recebe, encontra-se detalhada em cartas como a ilustrada na Figura 13, através das quais é possível avaliar o potencial energético solar de cada região.

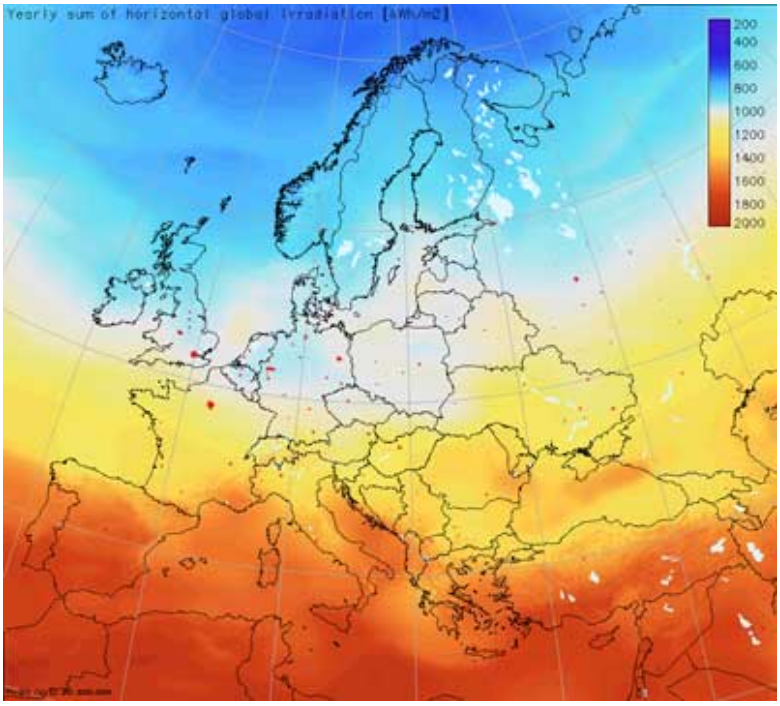

Figura 13- Níveis de radiação solar global anual na Europa *[kWh/m^2]*, PVGIS © European Communities, 2002-2005

É conhecido, que existem diversos factores que influenciam os níveis de radiação registados, tais como a latitude do local e a estação do ano. Assim sendo um país/região com uma menor latitude apresenta níveis de radiação solar mais elevados. Este facto é justificado pela Terra ser curva, deste modo a altura do sol varia com a latitude, conforme está representado na Figura 14.

Entende-se por altura do Sol o ângulo que este faz com o horizonte, assim sendo quanto menor é a altura do sol menor será a sua irradiância (intensidade da radiação solar), uma vez que os raios solares terão de percorrer uma maior distancia através da atmosfera. Por outro lado, quanto mais verticalmente os raios de sol atingirem a superfície da Terra mais concentrados estão, e por conseguinte maior quantidade de energia por unidade de tempo atinge a superfície.

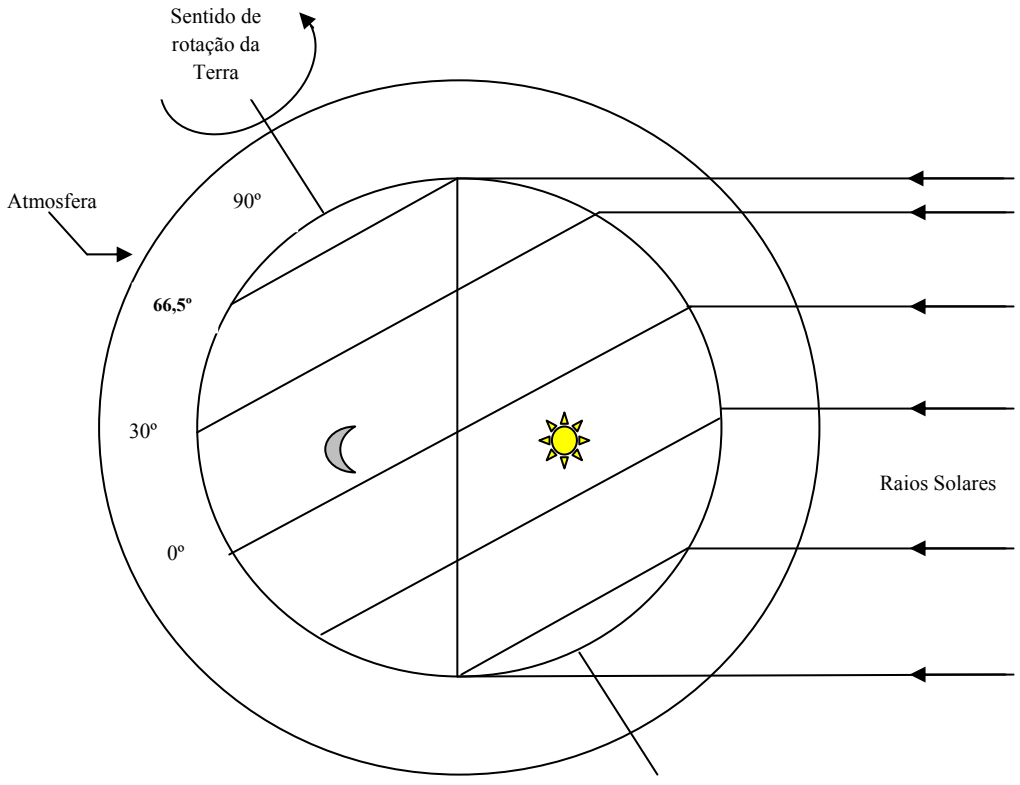

Figura 14- Variação da altura solar com a latitude

Para além dos factores já referidos, as estações do ano introduzem um outro factor para a captação da radiação solar. Uma vez que, na estação de Inverno a altura solar é menor do que na estação de Verão, obriga a que haja um compromisso entre a inclinação da superfície (painel solar), consoante a estação. Assim sendo uma superfície

inclinada nos meses de Inverno tem uma radiação incidente maior do que uma superfície horizontal durante a mesma estação. Segundo a Direcção Geral de Geologia e Energia (DGGE), a inclinação de um colector solar deve ser igual à latitude do local, menos 5º para utilização durante todo o ano. Caso o sistema seja para utilização em apenas numa altura específica do ano, deve-se seguir a regra apresentada na Tabela 1, de mais ou menos 15º conforme se queira favorecer a captação no Inverno ou no Verão, respectivamente.

Tabela 1- Inclinações típicas para colectores solares térmicos, (DGGE)

Tipo de utilização Inclinação	**Inclinação β**
Verão (casas de férias, hotéis de praia, piscinas descobertas, etc.)	Latitude -15º
Inverno (aquecimento ambiente, casas de montanha, etc.)	Latitude +15º
Anual (produção de águas quentes sanitárias, etc.)	Latitude -5º

Para além da inclinação (ângulo formado entre o plano que contem o colector e a vertical), o colector deve também ser orientado segundo um determinado azimute (ângulo formado entre a direcção Sul e a vertical do lugar). Numa superfície horizontal é indiferente a sua orientação geográfica, o mesmo não se verifica numa superfície inclinada ou vertical. Nas superfícies inclinadas existe uma maximização da radiação captada quando estas se encontram direccionadas para Sul, Figura15.

Por este motivo a instalação de colectores solares deve ser feita voltada para Sul. Se tal for impossível devido a aspectos construtivos da superfície de suporte ou devido a sombreamentos, pode-se instalar o colector solar sem prejuízo significativo da radiação captada, com um desvio de mais ou menos 15º em relação ao Sul geográfico. Em casos extremos pode ser feita a sua colocação com um desvio de 45º (sudeste ou sudoeste), tendo deste modo uma penalização de 10% na radiação máxima possível (orientação Sul).

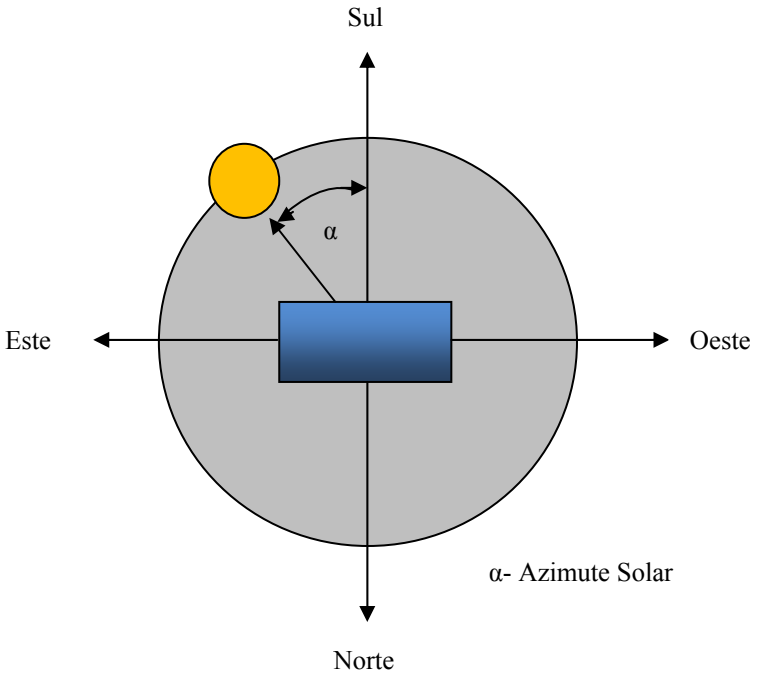

Figura 15- Orientação de painéis solares térmicos

Entende-se por radiação global a soma entre a radiação directa e a radiação difusa e pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$G_G = G_D + G_d \tag{2.7}$$

Numa superfície horizontal a radiação directa é dada por:

$$G_D = G_{ON} \times \tau_b \times \cos\left(\theta_Z\right) \tag{2.8}$$

onde θ_Z é o ângulo formado entre a radiação e a vertical do lugar. Sabendo que a radiação solar que chega à atmosfera terrestre ao longo do ano é dada pela equação,

$$G_{ON} = G_{SC} \times \left[1 + 0,033 \times \cos\left(\frac{360 \times n}{365}\right)\right] \tag{2.9}$$

onde G_{ON} é a radiação incidente numa superfície perpendicular aos raios solares, G_{SC} é a radiação solar que chega a atmosfera ($1367 W/m^2$), a qual pode ser demonstrada através da geometria do Sol, da Terra e a distância que os separa e *n* é o dia do ano. O efeito da atmosfera na radiação directa traduz-se pela Equação 2.10,

$$G_{DN} = G_{ON} \times \tau_b \tag{2.10}$$

com

$$\tau_b = a_0 + a_1 \times e^{\frac{-K}{\cos(\theta)}} \tag{2.11}$$

e

$$a_0 = 0,4237 - 0,00821 \times \left(6 - A\right)^2 \tag{2.12}$$

$$a_1 = 0,5055 - 0,00595 \times \left(6,5 - A\right)^2 \tag{2.13}$$

$$K = 0,2711 - 0,001858 \times \left(2,5 - A\right)^2 \tag{2.14}$$

em que *A* é a altitude em *km*. É de notar que as constantes a_0, a_1 e *k*, devem ser multiplicadas pelos factores de correcção consoante a estação do ano apresentados na Tabela 2,

Tabela 2- Factores de correcção

	r_0	r_1	r_k
Verão	0,97	0,99	1,02
Inverno	1,03	1,01	1,00

Para o cálculo da radiação difusa nas condições de céu limpo, utiliza-se a seguinte equação:

$$G_d = G_{SC} \times \cos\left(\theta_Z\right) \times \left(0,271 - 0,294 \times \tau_b\right) \tag{2.15}$$

Por último, é importante salientar que tanto a radiação directa como a difusa, variam consoante as horas do dia e a estação do ano, bem como com o ângulo de inclinação da superfície.

Capítulo 3

Sistemas Solares Térmicos

Conteúdo do capítulo

Neste capítulo é feita uma abordagem e explicação dos diversos tipos de sistemas solares térmicos. São enumerados os principais constituintes de um sistema desta natureza e qual o seu papel para o correcto funcionamento do sistema. Faz-se uma descrição dos vários tipos de soluções que existem e quais as suas principais aplicações. Por último, é feita uma abordagem aos sistemas solares termodinâmicos, explicando o seu princípio de funcionamento e é apresentado algum do trabalho de investigação que está a ser desenvolvido nesta matéria.

3.1 Aproveitamento Solar Térmico

Ao longo do tempo, tem-se verificado que o modo de conversão de energia solar mais eficiente e que mais viabilidade económica apresenta é a conversão térmica. A conversão térmica consiste em converter a energia proveniente do Sol em energia para aquecimento quer seja de espaços ambientes, águas quentes sanitárias, ou mesmo o aquecimento de piscinas. Esta conversão pode ser feita através de sistemas solares passivos ou activos.

Qualquer sistema solar térmico é composto por uma unidade de captação da radiação solar, uma unidade de armazenamento do calor e uma unidade de distribuição/utilização do calor. Por norma um sistema solar é constituído por um colector solar, reservatório, permutador, unidade de controlo, sistema de apoio e ainda por uma bomba hidráulica se for o caso de um sistema de circulação forçada.

São designados sistemas solares passivos, todos os sistemas em que o transporte de calor é feito de forma autónoma, isto é, sem ajuda de nenhum dispositivo externo e por conseguinte sem qualquer gasto de energia auxiliar. São exemplo de sistemas solares passivos a aplicação de modelos construtivos de edifícios, os quais são por si só, capazes de fazer o aquecimento do próprio edifício. Os sistemas solares activos são aqueles em que, o transporte de calor necessita de algum tipo de consumo de energia auxiliar para ser realizado (bomba de movimentação de fluído).

Existem várias tecnologias de conversão solar térmica, as quais podem-se diferenciar consoante as gamas de temperatura de utilização. Assim sendo, podem distinguir-se 4 principais gamas de temperaturas e as respectivas tecnologias associadas.

- Baixas temperaturas (até cerca de 90ºC)
- Médias temperaturas (de 90 a 150ºC)
- Elevadas temperaturas (de 150 a 300ºC)
- Muito elevadas temperaturas (maiores que 300ºC)

As aplicações a *baixas temperaturas* são normalmente o aquecimento de espaços ambiente, águas quentes sanitárias e o aquecimento de piscinas. Para este efeito são utilizados colectores planos, Figura 16, ou colectores do tipo CPC (Colectores Parabólicos Concentradores), Figura 17.

Figura 16- Colectores planos (www.geocities.com)

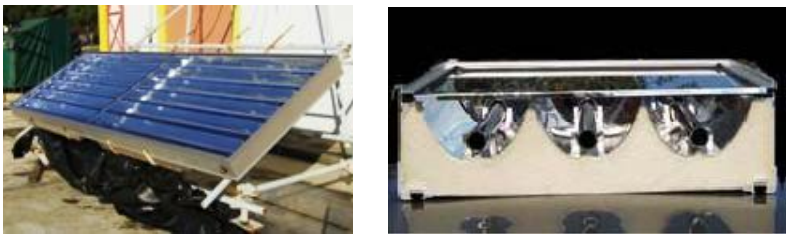

Figura 17- Colectores do tipo CPC (www.buildinggreen.com)

No que diz respeito as aplicações a *médias temperaturas*, estas são mais usuais em meio industrial designadamente para a produção de vapor de processo e outros processos de absorção e adsorção. Por norma são utilizados colectores do tipo CTV (Colector Tubo de Vácuo), Figura 18.

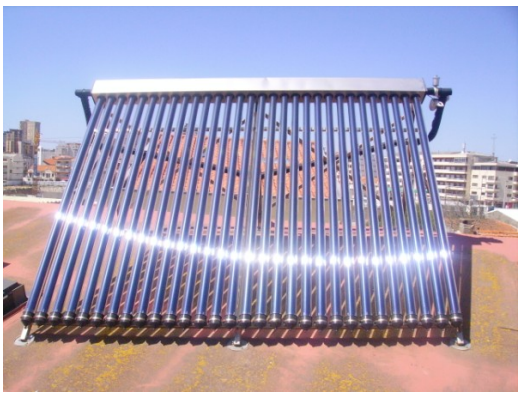

Figura 18- Colector Tubo de Vácuo (http://valeemartins.no.sapo.pt)

Relativamente às aplicações de *elevada temperatura*, estas são por norma destinadas a processos industriais de produção de vapor com o intuito de produzir energia eléctrica através de turbinas de vapor. Para estas aplicações é necessário recorrer a equipamentos designados por colectores CCP (colectores cilindro-parabólicos), Figura 19, os quais não são estacionários, isto é, são equipamentos que fazem um seguimento do movimento aparente do sol.

As aplicações de *muito elevada temperatura,* destinam-se exclusivamente à produção de electricidade em centrais solares, Figura 20, através da produção de vapor, o qual é utilizado por uma turbina de expansão que se encontra acoplada a um gerador.

Figura 19- Colectores Cilindro-Parabólicos, (http://www.edprenovaveis.com)

Todo o processo funciona segundo um ciclo termodinâmico de *elevada temperatura*. Para este tipo de processos são dispostos conjuntos de espelhos (heliostátos), que direccionam a radiação solar para um único ponto localizado numa torre.

Figura 20- Central de energia solar térmica (http://www.solarpaces.org)

3.2 Colector Solar

Os colectores solares são equipamentos que permitem a captação da radiação solar e a transferência desta mesma radiação sob a forma de energia térmica para um determinado fluído (líquido ou ar). A captação da radiação solar é feita através de uma propriedade física designada por "efeito de estufa". Este efeito é conseguido quando se coloca sobre a superfície absorvedora (superfície na qual se quer captar a radiação), uma

superfície selectiva a qual é composta por um material translúcido (vidro ou plástico), Figura 21.

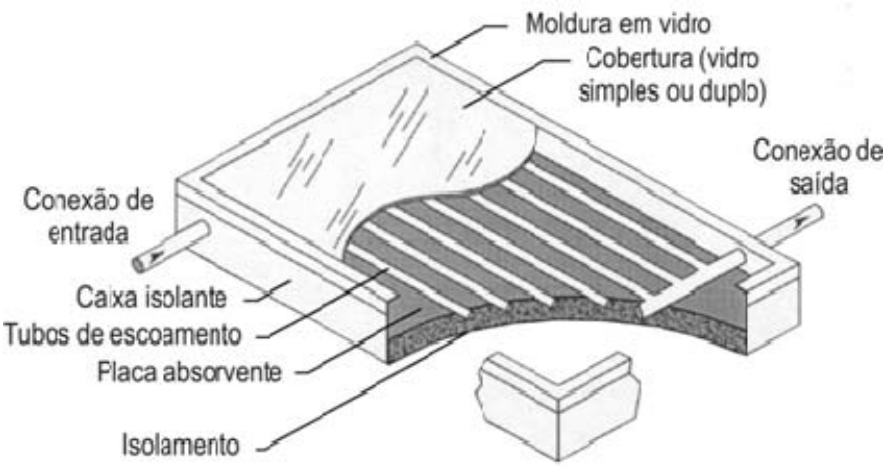

Figura 21- Esquema do funcionamento painel solar, (A. Borges,2006)

Sabendo que a radiação solar está contida nos comprimentos de onda menores através dos materiais da superfície selectiva, os quais têm um coeficiente de transmissão elevado para baixos comprimentos de onda, consegue captar-se praticamente toda a radiação incidente. Por outro lado como a radiação emitida pela superfície de captação está compreendida nos comprimentos de onda maiores, esta não consegue atravessar a superfície selectiva. Deste modo consegue reter-se grande parte da radiação incidente no colector solar.

Os colectores planos captam a radiação directa e a difusa e por esta razão estão fixos, os colectores concentradores captam apenas a radiação directa. Este facto, faz com que os colectores concentradores, para o seu perfeito funcionamento, necessitem de um dispositivo para fazer o seguimento do movimento aparente do sol.

A qualidade de um colector solar seja ele de que tipo for, pode ser indicada pelo seu rendimento (η), o qual é uma relação entre a capacidade de absorção da radiação incidente, designada por rendimento óptico (η_0), e as perdas de calor para o exterior. O rendimento óptico varia no tempo, devido à diferente inclinação dos raios solares (η_0=*max*. para raios na perpendicular), esta diferença de inclinações faz variar os coeficientes de absorção e transmissão do colector. O caudal de fluído que circula no colector também altera o seu rendimento. Esta alteração é mais acentuada nos colectores a ar do que nos colectores a água.

3.3 Depósito/Permutador

Outro dos constituintes de enorme importância num sistema solar térmico é o grupo Depósito/Permutador. Este elemento tem uma dupla função, armazena a água quente de modo a que esta esteja disponível quando o utilizador necessitar, assim como é responsável pela troca de calor entre o fluído que circula nos painéis e a água de utilização para as águas quentes sanitárias. O grupo Depósito/Permutador é constituído por um depósito cilíndrico em aço vitrificado ou aço inox e que no seu interior tem um permutador de calor do tipo serpentina (simples ou dupla), através da qual se realizam as trocas de calor. No mercado existem diversos modelos deste componente pelo que na altura da escolha, e uma vez que a energia captada através do Sol ao longo do dia varia, devem ser tidos em conta os consumos e a utilização diária do sistema.

Existem três parâmetros relevantes na escolha de um reservatório para um sistema solar. Para além da capacidade total do reservatório (normalmente expressa em litros), deve ter-se em conta o isolamento do reservatório, relação altura/diâmetros e protecção do próprio reservatório (corrosão, bactérias). O isolamento do reservatório é um factor chave na sua construção, uma vez que dele vai depender a quantidade de energia que se perde para o exterior durante a sua utilização (influência fortemente a eficiência do sistema). Por norma os isolamentos utilizados são à base de espuma de poliuretano. A relação altura/diâmetro é importante porque, quanto maior for, melhor será a estratificação do fluído no interior do reservatório, conseguindo-se assim um máximo aproveitamento da energia solar e uma maior superfície de permuta na serpentina. A protecção do reservatório contra corrosão é feita através de um revestimento interior à base de esmalte e por vezes ainda através de um ânodo de magnésio que permite uma protecção catódica. Os reservatórios destinados a este tipo de utilização são munidos de uma válvula de pressão, a qual abre se for ultrapassada uma determinada pressão no interior do reservatório, de modo a prevenir o risco de explosão

3.4 Grupo de Circulação

Existe um conjunto de elementos básicos e necessários ao funcionamento de um sistema solar, que pela sua dimensão, simplicidade e relação têm sido agrupados e

intitulados de grupo de circulação. Este grupo, por norma é constituído por um sensor de temperatura, válvulas, bomba hidráulica (sistema de circulação forçada), caudalímetro, e regulador de caudal. Este grupo de circulação é responsável por fazer a movimentação do fluído do sistema (sistema de circulação forçada), bem como permite de certo modo monitorizar algumas das condições do seu funcionamento. Integra constituintes indispensáveis para o funcionamento do sistema solar de uma forma económica e de fácil instalação, uma vez que são módulos que vêm pré-montados nos quais o instalador apenas tem de fazer a sua instalação no local. A bomba de circulação deve ser devidamente dimensionada para as perdas de carga de todo o sistema. Assim, evita-se que fique sobredimensionada, provocando um aumento do custo de funcionamento do sistema desnecessário.

3.5 Grupo de Controlo

O grupo de controlo tem como objectivo fazer uma monitorização constante das temperaturas verificadas nos painéis solares e no depósito, bem como os caudais circulantes situação do sistema de apoio (ligado/desligado), e o estado da bomba de circulação. Deste modo, através de diferenciais de temperaturas o sistema "gere" todo o funcionamento do sistema solar. Isto é, dá ordem de arranque à bomba de circulação quando a temperatura do depósito baixa, caso as condições exteriores (radiação solar) sejam propícias. Ou então dá ordem de funcionamento ao sistema de apoio para colmatar a diferença de temperaturas caso as condições exteriores não sejam as adequadas. Assim como é responsável pela ordem de paragem sempre que sejam atingidas as condições óptimas para o utilizador.

3.6 Sistema de Apoio

O sistema de apoio acaba por ser sempre necessário em qualquer sistema solar térmico, uma vez que nem sempre o sistema consegue fornecer toda a quantidade de energia que o utilizador necessita. Principalmente nos meses de Inverno, o sistema de apoio torna-se um órgão vital para dar resposta à carga térmica necessária. Este grupo de apoio pode fazer recurso a vários tipos de fontes de energia. Pode ser um

esquentador/caldeira que utilize gás butano, propano ou natural, uma resistência eléctrica ou ainda ser um queimador a lenha ou gasóleo. O tipo de energia do sistema de apoio influencia fortemente a viabilidade económica de um sistema solar, sendo que quanto mais elevado for o custo desta energia maior será a viabilidade deste tipo de sistemas. Por norma, a situação mais comum em Portugal é que na altura da instalação de um sistema solar numa habitação, a fonte de energia disponível seja baseada em gás propano ou butano. Assim para o estudo da viabilidade irá ter-se em conta o custo desta fonte de energia, que irá conduzir a melhores resultados, quando comparado com o gás natural.

3.7 Tipos de sistemas solares térmicos

Existem diversas configurações de sistemas solares térmicos consoante o tipo de aplicação pretendido. Os sistemas podem ser mais ou menos complexos dependendo da sua utilização, isto é, se o sistema se destina ao sector industrial, por norma são necessárias temperaturas de utilização mais elevadas o que obriga à introdução de mais componentes no sistema e uma maior volumetria. Na Figura 22, é apresentado uma das aplicações mais simples e comuns dos sistemas solares térmicos, designada por sistemas de termossifão. Tem como objectivo fazer o aquecimento de águas quentes sanitárias (AQS), e por norma, uma temperatura de utilização sempre inferior a 80 ^{o}C. Este aquecimento pode ser feito de duas maneiras: de forma directa, no qual o fluído que é aquecido no painel solar entra directamente no termoacumulador, Figura 22 a), e de forma indirecta, no qual o fluído que aquece no painel solar passa por uma serpentina no interior do termoacumulador onde se efectua a troca de calor, Figura 22 b),

Este tipo de sistemas não necessita de ter uma bomba circuladora uma vez que funciona segundo o princípio de termossifão. Necessita apenas que o depósito fique localizado a uma altura superior à dos colectores solares. Este tipo de sistemas funciona do seguinte modo: a água fria como tem maior densidade desce e entra na parte inferior do colector solar, onde recebe energia. Este ganho de energia provoca uma diminuição da sua densidade, o que faz com que a água quente tenha tendência a subir pelos colectores e a entrar de novo no depósito

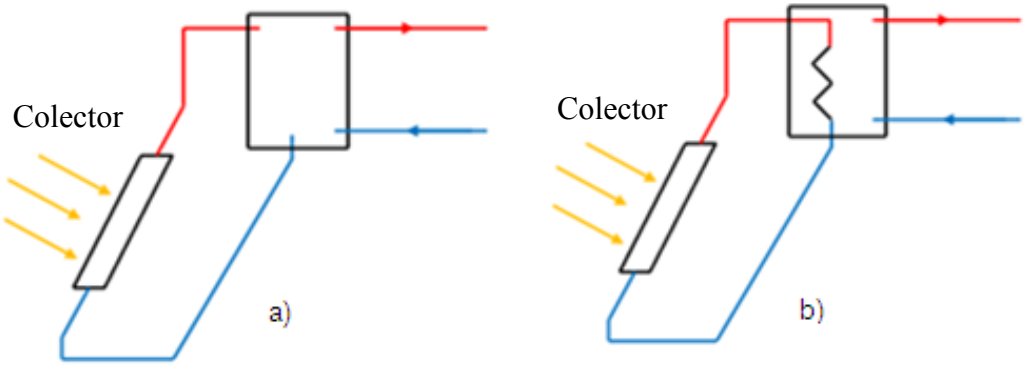

Figura 22- Sistemas de termossifão

.. Este tipo de sistemas tem como vantagem o menor custo de instalação dada a ausência de alguns componentes, tais como a bomba de circulação, e a sua simplicidade de montagem. Como inconvenientes temos a localização do depósito no telhado, o que provoca perdas de calor acentuadas em especial nos climas mais frios.

Na Figura 23 a) pode observar-se um sistema de circulação forçada (possui uma bomba hidráulica). Este tipo de sistema é um pouco mais desenvolvido, o qual já possui um dispositivo de apoio e uma unidade de controlo. O dispositivo de apoio funciona a electricidade, gás ou outro tipo de energia. Serve para colmatar a diferença entre a temperatura da água que sai do reservatório com a temperatura de utilização, sempre que o sistema solar não consiga fornecer toda a energia necessária (Inverno ou dias de céu encoberto). Deste modo, é possível manter constante a temperatura de utilização. A unidade de controlo monitoriza a temperatura da água do reservatório e automaticamente liga a bomba de modo a que apenas circule fluído nos colectores quando a temperatura de saída for superior à temperatura de entrada.

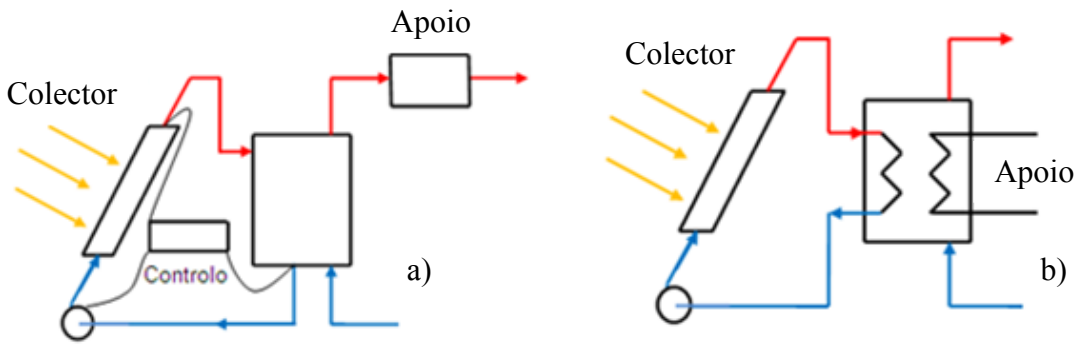

Figura 23- Sistema de circulação forçada

Na Figura 23 b) mostra-se um sistema de circulação forçada, no qual o sistema de apoio e a acumulação estão juntos. Esta solução embora seja menos eficiente dada a proximidade dos dois sistemas por vezes é utilizada por uma questão de rentabilização de espaço e meios.

Na Figura 24 é apresentado um sistema de circulação forçada, no qual existem três depósitos. Um primeiro designado por permutador de calor onde a energia captada nos colectores solares é transferida para o fluído. O segundo reservatório, representado por pela letra *A*, serve para diminuir o diferencial térmico entre a água que vem da rede e a água que já circula no sistema, deste modo há um pré-aquecimento da água que acabou de entrar no sistema. No terceiro reservatório é feito o apoio através de energia auxiliar (separadamente do sistema de acumulação e por conseguinte com maior eficiência), sempre que seja necessário aumentar a temperatura final de utilização da água.

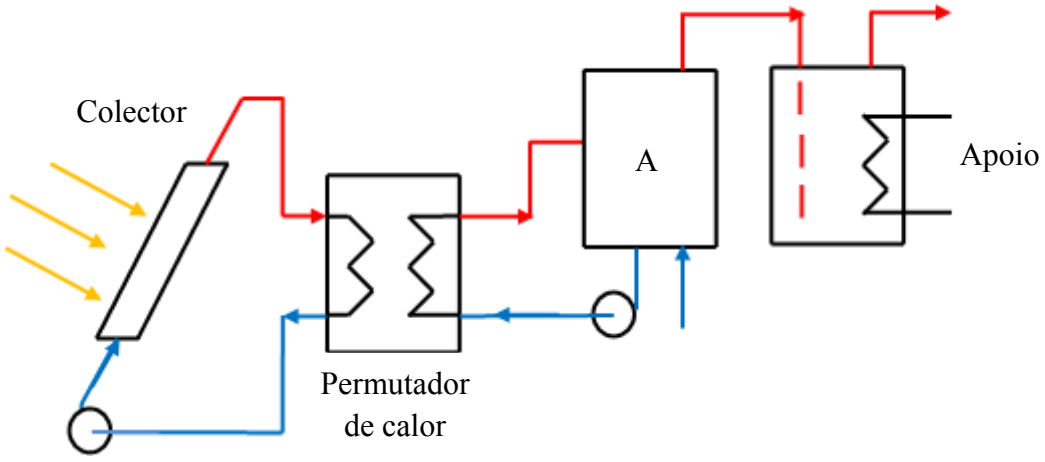

Figura 24- Sistema de circulação forçada para aquecimento de AQS

3.8 Sistemas solar termodinâmicos

Com o passar do tempo têm vindo a ser desenvolvidos novos sistemas e tecnologias de aproveitamento de energia solar. Têm surgido então novos conceitos como é o caso dos painéis solares termodinâmicos. Este tipo de sistema tem na base do seu funcionamento o princípio do físico francês Nicolas Carnot (bomba de calor). O sistema está representado esquematicamente na Figura 25 e é constituído por um painel solar (evaporador), uma válvula de expansão, um compressor e um condensador. O

sistema tem um fluído frigorigéneo que circula num circuito fechado a temperaturas negativas, respeitando as regras do ciclo de compressão de vapor. Neste tipo de sistemas solares, o objectivo é a remoção de calor da fonte fria através do evaporador (painel solar), e a rejeição para a fonte quente através do condensador (depósito de acumulação de água). No ciclo, o compressor permite aumentar a pressão fazendo com que o fluído frigorigéneo passe do estado gasoso para o estado líquido. A válvula de expansão vai diminuir a pressão do ciclo obrigando o fluído a passar do estado líquido para o estado gasoso. Deste modo, o fluído capta calor nos painéis solares e em seguida liberta-o na água através de um permutador de calor.

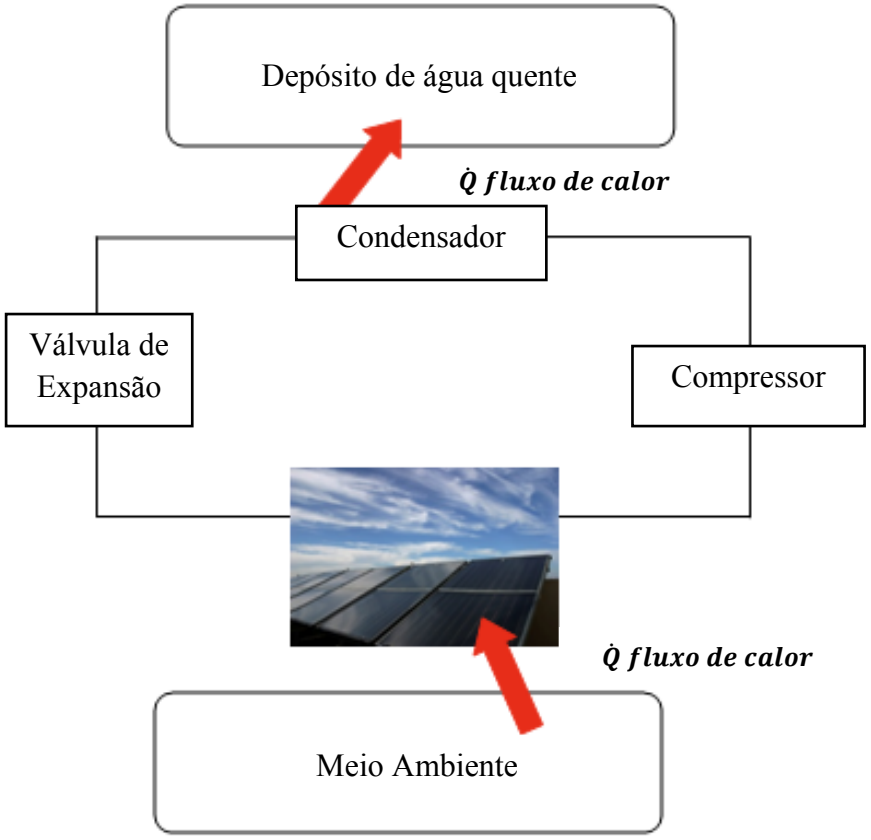

Figura 25- Representação esquemática do funcionamento de um sistema solar termodinâmico

Também existem estudos desenvolvidos na conjugação de uma bomba de calor de funcionamento geotérmico, com aplicação de painéis solares, como é o caso do estudo desenvolvido por V.Trillat-Berdal et al. (2007), onde foi criado um sistema de aquecimento e/ou arrefecimento, no qual em paralelo com os painéis solares funciona uma bomba de calor, Figura 26. Esta bomba de calor, tanto utiliza o gradiente térmico

proporcionado pelos painéis solares para realizar as trocas de calor, como o gradiente proveniente da energia geotérmica. Este sistema baseia-se à semelhança do caso anterior no ciclo de compressão de vapor, possuindo também um compressor, uma válvula de expansão, um evaporador e um condensador.

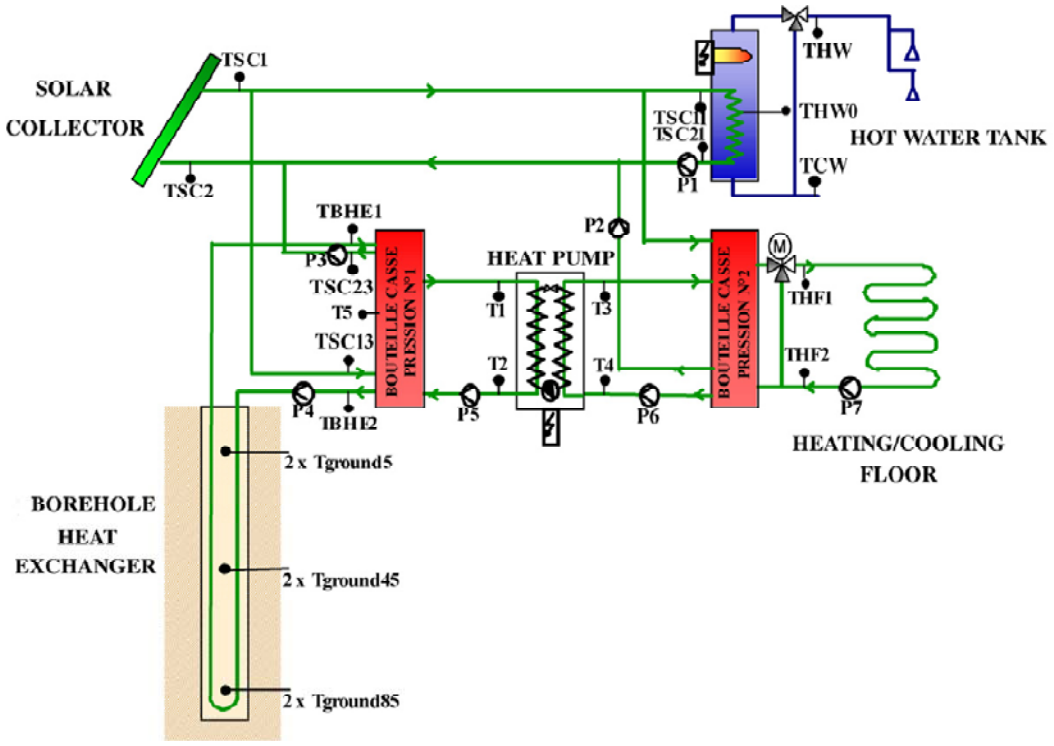

Figura 26- Esquema do sistema de colectores solares assistidos por uma bomba de calor de funcionamento geotérmico, V. Trillat-Berdal et al, 2007, Coupling of geothermal heat pumps with thermal solar collectors, Applied Thermal Engineering, 1750–1755

Capítulo 4

Modelo Matemático

Conteúdo do Capítulo

Neste capítulo é explicada toda a metodologia tida em conta no processo matemático que permitiu desenvolver as equações para o cálculo da fracção solar, *f*. São apresentadas as equações desenvolvidas. É feita a validação das equações através de dois casos tipo, através dos quais é possível comparar os resultados obtidos através das equações, do método de cálculo *f-chart* e do Solterm.

4.1 Equações da fracção solar

Para a concretização deste trabalho foi necessário realizar trabalho prévio no que diz respeito ao desenvolvimento de algumas equações matemáticas. Tendo por base algumas equações já conhecidas, foram desenvolvidas equações referentes ao parâmetro da fracção solar *f*, o qual representa a relação entre a energia fornecida pelo sol nos colectores e a energia necessária ou carga térmica.

De modo a avaliar o comportamento de um sistema solar térmico activo num dado local e num dado perfil de utilização é necessário conhecer alguns parâmetros e características do sistema. A energia necessária ao aquecimento das águas quentes sanitárias, designada por carga térmica é um dos mais importantes. Este parâmetro

depende do consumo médio diário de água quente, o qual varia muito consoante os hábitos do utilizador, a sua localização geográfica e o seu poder económico. Segundo o RCCTE, Decreto-Lei 80/2006, este, estabelece um consumo de água quente de 40 litros por dia por ocupante para habitações.
O modelo tem por base as seguintes equações,

$$f = \frac{Q_{solar}}{Q_{CT}} \tag{4.1}$$

onde *f* é a fracção solar, Q_{solar} é a energia fornecida pelo sol e Q_{CT} é a energia necessária (carga térmica), em *kWh/mês* e é fornecida pela equação 4.2;

$$Q_{CT} = 0,00116 \times V_{cons} \times NH \times ND \times (T_{utiliz} - T_{rede}) \tag{4.2}$$

onde V_{cons} é o volume de água consumido por dia e por habitante em *l/dia/pessoa*, *NH* é o número de habitantes, *ND* é o número de dias do mês, T_{utiliz} é a temperatura de utilização da água em *ºC*, e T_{rede} é a temperatura da água da rede em *ºC*. Pelo mesmo Decreto-Lei (80/2006), estabelece-se para efeitos de cálculo 15*ºC* para a temperatura da água da rede. Para estimar o valor de Q_{solar} (Energia fornecida pelo sol), existem vários métodos de cálculo que permitem avaliar o comportamento de um sistema solar. Um dos mais comuns é o método *f-chart*, o qual permite a obtenção da fracção solar de um determinado sistema através da leitura de cartas, valores de tabelas e interpretações gráficas. Ao longo deste trabalho tentou-se "traduzir" todas estas cartas para relações matemáticas, bem como o desenvolvimento e simplificação de equações já existentes. Assim, de um modo simplificado, consegue introduzir-se estas equações num código computacional, tento em vista a obtenção de um resultado rápido e preciso.

No método *f-chart,* para determinar a fracção solar média para cada mês, é necessário calcular dois coeficientes, *X* e *Y*. Segundo este método as equações apresentadas são as seguintes:

$$X = X_0 \times C_1 \times C_2 \tag{4.3}$$

$$X_0 = \frac{0,024 \times ND \times K \times (100 - \overline{T}_{amb}) \times A}{Q_{CT}} \tag{4.4}$$

$$Y = \frac{\overline{I} \times \overline{\eta}_o \times ND \times A}{Q_{CT}} \tag{4.5}$$

onde, ND é o numero de dias do mês, $\overline{T}_{amb}$ é a temperatura média ambiente exterior, K é o coeficiente de perdas do colector ($W/m^2/ºC$), A é a área útil de colectores (m^2), $\bar{\eta}_0$ é o rendimento óptico médio do colector e $\overline{I}$ é a radiação media mensal incidente na superfície dos colectores ($kWh/m^2/dia$).

A partir deste momento, segundo o método *f-chart*, a fracção solar deve ser determinada com base na leitura de gráficos e cartas, introduzindo os parâmetros calculados pelas fórmulas acima apresentadas.

A partir da Equação 4.6 até à Equação 4.23, todas elas foram desenvolvidas no âmbito deste trabalho, e têm como objectivo a sua utilização no código computacional tendo em vista o cálculo da fracção solar *f*.

O factor C_1 é um factor que depende da área de colectores e do volume de armazenamento. A partir da Figura 27, foi possível obter a equação 4.6,

Figura 27- Factor de correcção da capacidade de acumulação (C_1)

Uma vez que a capacidade de acumulação (volume do depósito) faz variar a fracção solar, torna-se necessário fazer a correcção deste valor. Esta correcção é feita através do factor C_1. Começou-se então por deduziu-se a seguinte equação para o factor de correcção C_1:

$$C_1 = -4\times10^{-8}\times Z^3 + 3\times10^{-5}\times Z^2 - 0,007\times Z + 1,425 \tag{4.6}$$

onde Z é o volume em litros do reservatório/depósito.

O factor C_2 é necessário uma vez que a temperatura à qual a água vai ser utilizada (temperatura de utilização), condiciona o comportamento do sistema. Para o factor de correcção C_2, deduziu-se as seguintes expressões:

$$C_2 = \begin{cases} -0,016\times\overline{T}_{amb} + 1,21 & T_{utiliz} = 40 \\ -0,014\times\overline{T}_{amb} + 1,32 & T_{utiliz} = 50 \\ -0,013\times\overline{T}_{amb} + 1,434 & T_{utiliz} = 60 \\ -0,011\times\overline{T}_{amb} + 1,544 & T_{utiliz} = 70 \\ -0,01\times\overline{T}_{amb} + 1,666 & T_{utiliz} = 80 \end{cases} \tag{4.7}$$

Usando ferramentas adequadas, foram simplificadas algumas equações de modo a obterem-se expressões o mais reduzidas possíveis. Depois de serem trabalhados alguns pressupostos obtiveram-se as equações abaixo apresentadas.

$$Y = \frac{0,8103448276 \times \overline{I} \times \eta_o \times A}{V_{cons} \times NH \times \left(T_{utiliz} - T_{rede}\right)} \tag{4.8}$$

$$X = \frac{8,28 \times 10^{-7} \times ND \times K \times \left(T_{amb} - 100\right) \times A \times C_2 \times \left(Z - 549,514\right) \times \left(Z^2 - 200,486 \times Z + 64830,04\right)}{V_{cons} \times NH \times ND \times \left(T_{utiliz} - T_{rede}\right)} \tag{4.9}$$

Depois de interligar e simplificar todas as equações anteriores obtiveram-se as seguintes relações matemáticas, as quais por si só permitem determinar o parâmetro da fracção solar *f*, deste modo as equações abaixo permitem determinar a fracção solar de um sistema solar conforme as condições especificadas.

Para um sistema a líquido e temperatura de utilização de 40ºC (4.10)

$$f = \frac{0,8338448276 \times \bar{I} \times \bar{\eta}_0 \times A}{V_{cons} \times NH \times (T_{utiliz} - T_{rede})} -$$

$$- \frac{5,3820 \times 10^{-8} \times K \times (\bar{T}_{amb} - 100) \times A \times (-0,016 \times \bar{T}_{amb} + 1,21)}{V_{cons} \times NH \times (T_{utiliz} - T_{rede})} \times$$

$$\times (Z - 549,514) \times (Z^2 - 200,486 \times Z + 64830,04) -$$

$$- \frac{0,1608813912 \times \bar{I}^2 \times \bar{\eta}o^2 \times A^2}{{V_{cons}}^2 \times NH^2 \times (T_{utiliz} - T_{rede})^2} +$$

$$+ \frac{1}{{V_{cons}}^2 \times NH^2 \times (T_{utiliz} - T_{rede})^2} \times (1,234051200 \times 10^{-15} \times K^2 \times (\bar{T}_{amb} - 100)^2 \times$$

$$\times A^2 \times (-0,016 \times \bar{T}_{amb} + 1,21)^2 \times (Z - 549,514)^2 \times (Z^2 - 200,486 \times Z + 64830,04)^2) +$$

$$+ \frac{0,01144058028 \times \bar{I}^3 \times \bar{\eta}o^3 \times A^3}{{V_{cons}}^3 \times NH^3 \times (T_{utiliz} - T_{rede})^3}$$

Para um sistema a ar e temperatura de utilização de 40ºC (4.11)

$$f = \frac{0{,}8427586207 \times \bar{I} \times \bar{\eta}_0 \times A}{V_{cons} \times NH \times (T_{utiliz} - T_{rede})} -$$

$$- \frac{5{,}3820 \times 10^{-8} \times K \times (\bar{T}_{amb} - 100) \times A \times (-0{,}016 \times \bar{T}_{amb} + 1{,}21)}{V_{cons} \times NH \times (T_{utiliz} - T_{rede})} \times$$

$$\times (Z - 549{,}514) \times (Z^2 - 200{,}486 \times Z + 64830{,}04) -$$

$$- \frac{0{,}1044087396 \times \bar{I}^2 \times \bar{\eta}o^2 \times A^2}{{V_{cons}}^2 \times NH^2 \times (T_{utiliz} - T_{rede})^2} +$$

$$+ \frac{1}{{V_{cons}}^2 \times NH^2 \times (T_{utiliz} - T_{rede})^2} \times (1{,}282042080 \times 10^{-15} \times K^2 \times (\bar{T}_{amb} - 100)^2 \times$$

$$\times A^2 \times (-0{,}016 \times \bar{T}_{amb} + 1{,}21)^2 \times (Z - 549{,}514)^2 \times (Z^2 - 200{,}486 \times Z + 64830{,}04)^2) +$$

$$+ \frac{0{,}005055140124 \times \bar{I}^3 \times \bar{\eta}o^3 \times A^3}{{V_{cons}}^3 \times NH^3 \times (T_{utiliz} - T_{rede})^3}$$

Para um sistema a líquido e temperatura de utilização de 50ºC (4.12)

$$f = \frac{0{,}8338448276 \times \bar{I} \times \bar{\eta}_0 \times A}{V_{cons} \times NH \times (T_{utiliz} - T_{rede})} -$$

$$- \frac{5{,}3820 \times 10^{-8} \times K \times (\bar{T}_{amb} - 100) \times A \times (-0{,}014 \times \bar{T}_{amb} + 1{,}32)}{V_{cons} \times NH \times (T_{utiliz} - T_{rede})} \times$$

$$\times (Z - 549{,}514) \times (Z^2 - 200{,}486 \times Z + 64830{,}04) -$$

$$- \frac{0{,}1608813912 \times \bar{I}^2 \times \bar{\eta}o^2 \times A^2}{{V_{cons}}^2 \times NH^2 \times (T_{utiliz} - T_{rede})^2} +$$

$$+ \frac{1}{{V_{cons}}^2 \times NH^2 \times (T_{utiliz} - T_{rede})^2} \times (1{,}234051200 \times 10^{-15} \times K^2 \times (\bar{T}_{amb} - 100)^2 \times$$

$$\times A^2 \times (-0{,}014 \times \bar{T}_{amb} + 1{,}32)^2 \times (Z - 549{,}514)^2 \times (Z^2 - 200{,}486 \times Z + 64830{,}04)^2) +$$

$$+ \frac{0{,}01144058028 \times \bar{I}^3 \times \bar{\eta}o^3 \times A^3}{{V_{cons}}^3 \times NH^3 \times (T_{utiliz} - T_{rede})^3}$$

Para um sistema a ar e temperatura de utilização de 50℃ (4.13)

$$f = \frac{0{,}8427586207 \times \bar{I} \times \bar{\eta}_0 \times A}{V_{cons} \times NH \times (T_{utiliz} - T_{rede})} -$$

$$- \frac{5{,}3820 \times 10^{-8} \times K \times (\bar{T}_{amb} - 100) \times A \times (-0{,}014 \times \bar{T}_{amb} + 1{,}32) \times (Z - 549{,}514)}{V_{cons} \times NH \times (T_{utiliz} - T_{rede})} \times$$

$$\times (Z^2 - 200{,}486 \times Z + 64830{,}04) -$$

$$- \frac{0{,}1044087396 \times \bar{I}^2 \times \bar{\eta}o^2 \times A^2}{{V_{cons}}^2 \times NH^2 \times (T_{utiliz} - T_{rede})^2} +$$

$$+ \frac{1}{{V_{cons}}^2 \times NH^2 \times (T_{utiliz} - T_{rede})^2} \times (1{,}282042080 \times 10^{-15} \times K^2 \times (\bar{T}_{amb} - 100)^2 \times$$

$$\times A^2 \times (-0{,}014 \times \bar{T}_{amb} + 1{,}32)^2 \times (Z - 549{,}514)^2 \times (Z^2 - 200{,}486 \times Z + 64830{,}04)^2) +$$

$$+ \frac{0{,}005055140124 \times \bar{I}^3 \times \bar{\eta}o^3 \times A^3}{{V_{cons}}^3 \times NH^3 \times (T_{utiliz} - T_{rede})^3}$$

Para um sistema a líquido e temperatura de utilização de 60℃ (4.14)

$$f = \frac{0{,}8338448276 \times \bar{I} \times \bar{\eta}_0 \times A}{V_{cons} \times NH \times (T_{utiliz} - T_{rede})} -$$

$$- \frac{5{,}3820 \times 10^{-8} \times K \times (\bar{T}_{amb} - 100) \times A \times (-0{,}013 \times \bar{T}_{amb} + 1{,}434)}{V_{cons} \times NH \times (T_{utiliz} - T_{rede})} \times$$

$$\times (Z - 549{,}514) \times (Z^2 - 200{,}486 \times Z + 64830{,}04) -$$

$$- \frac{0{,}1608813912 \times \bar{I}^2 \times \bar{\eta}o^2 \times A^2}{{V_{cons}}^2 \times NH^2 \times (T_{utiliz} - T_{rede})^2} +$$

$$+ \frac{1}{{V_{cons}}^2 \times NH^2 \times (T_{utiliz} - T_{rede})^2} \times (1{,}234051200 \times 10^{-15} \times K^2 \times (\bar{T}_{amb} - 100)^2 \times$$

$$\times A^2 \times (-0{,}013 \times \bar{T}_{amb} + 1{,}434)^2 \times (Z - 549{,}514)^2 \times (Z^2 - 200{,}48 \times Z + 64830{,}04)^2) +$$

$$+ \frac{0{,}01144058028 \times \bar{I}^3 \times \bar{\eta}o^3 \times A^3}{{V_{cons}}^3 \times NH^3 \times (T_{utiliz} - T_{rede})^3}$$

Para um sistema a ar e temperatura de utilização de 60ºC (4.15)

$$f = \frac{0{,}8427586207 \times \bar{I} \times \bar{\eta}_0 \times A}{V_{cons} \times NH \times (T_{utiliz} - T_{rede})} -$$

$$- \frac{5{,}3820 \times 10^{-8} \times K \times (\bar{T}_{amb} - 100) \times A \times (-0{,}013 \times \bar{T}_{amb} + 1{,}434) \times (Z - 549{,}514)}{V_{cons} \times NH \times (T_{utiliz} - T_{rede})} \times$$

$$\times (Z^2 - 200{,}486 \times Z + 64830{,}04) -$$

$$- \frac{0{,}1044087396 \times \bar{I}^2 \times \bar{\eta}o^2 \times A^2}{{V_{cons}}^2 \times NH^2 \times (T_{utiliz} - T_{rede})^2} +$$

$$+ \frac{1}{{V_{cons}}^2 \times NH^2 \times (T_{utiliz} - T_{rede})^2} \times (1{,}282042080 \times 10^{-15} \times K^2 \times (\bar{T}_{amb} - 100)^2 \times$$

$$\times A^2 \times (-0{,}013 \times \bar{T}_{amb} + 1{,}434)^2 \times (Z - 549{,}514)^2 \times (Z^2 - 200{,}48 \times Z + 64830{,}04)^2) +$$

$$+ \frac{0{,}005055140124 \times \bar{I}^3 \times \bar{\eta}o^3 \times A^3}{{V_{cons}}^3 \times NH^3 \times (T_{utiliz} - T_{rede})^3}$$

Para um sistema a líquido e temperatura de utilização de 70ºC (4.16)

$$f = \frac{0{,}8338448276 \times \bar{I} \times \bar{\eta}_0 \times A}{V_{cons} \times NH \times (T_{utiliz} - T_{rede})} -$$

$$- \frac{5{,}3820 \times 10^{-8} \times K \times (\bar{T}_{amb} - 100) \times A \times (-0{,}011 \times \bar{T}_{amb} + 1{,}544) \times (Z - 549{,}514)}{V_{cons} \times NH \times (T_{utiliz} - T_{rede})} \times$$

$$\times (Z^2 - 200{,}486 \times Z + 64830{,}04) -$$

$$- \frac{0{,}1608813912 \times \bar{I}^2 \times \bar{\eta}o^2 \times A^2}{{V_{cons}}^2 \times NH^2 \times (T_{utiliz} - T_{rede})^2} +$$

$$+ \frac{1}{{V_{cons}}^2 \times NH^2 \times (T_{utiliz} - T_{rede})^2} \times (1{,}234051200 \times 10^{-15} \times K^2 \times (\bar{T}_{amb} - 100)^2 \times$$

$$\times A^2 \times (-0{,}011 \times \bar{T}_{amb} + 1{,}544)^2 \times (Z - 549{,}514)^2 \times (Z^2 - 200{,}48 \times Z + 64830{,}04)^2) +$$

$$+ \frac{0{,}01144058028 \times \bar{I}^3 \times \bar{\eta}o^3 \times A^3}{{V_{cons}}^3 \times NH^3 \times (T_{utiliz} - T_{rede})^3}$$

Para um sistema a ar e temperatura de utilização de 70ºC (4.17)

$$f = \frac{0{,}8427586207 \times \bar{I} \times \bar{\eta}_0 \times A}{V_{cons} \times NH \times (T_{utiliz} - T_{rede})} -$$

$$- \frac{5{,}3820 \times 10^{-8} \times K \times (\bar{T}_{amb} - 100) \times A \times (-0{,}011 \times \bar{T}_{amb} + 1{,}544) \times (Z - 549{,}514)}{V_{cons} \times NH \times (T_{utiliz} - T_{rede})} \times$$

$$\times (Z^2 - 200{,}486 \times Z + 64830{,}04) -$$

$$- \frac{0{,}1044087396 \times \bar{I}^2 \times \bar{\eta}o^2 \times A^2}{{V_{cons}}^2 \times NH^2 \times (T_{utiliz} - T_{rede})^2} +$$

$$+ \frac{1}{{V_{cons}}^2 \times NH^2 \times (T_{utiliz} - T_{rede})^2} \times (1{,}282042080 \times 10^{-15} \times K^2 \times (\bar{T}_{amb} - 100)^2 \times$$

$$\times A^2 \times (-0{,}011 \times \bar{T}_{amb} + 1{,}544)^2 \times (Z - 549{,}514)^2 \times (Z^2 - 200{,}48 \times Z + 64830{,}04)^2) +$$

$$+ \frac{0{,}00505514124 \times \bar{I}^3 \times \bar{\eta}o^3 \times A^3}{{V_{cons}}^3 \times NH^3 \times (T_{utiliz} - T_{rede})^3}$$

Para um sistema a líquido e temperatura de utilização de 80ºC (4.18)

$$f = \frac{0{,}8338448276 \times \bar{I} \times \bar{\eta}_0 \times A}{V_{cons} \times NH \times (T_{utiliz} - T_{rede})} -$$

$$- \frac{5{,}3820 \times 10^{-8} \times K \times (\bar{T}_{amb} - 100) \times A \times (-0{,}01 \times \bar{T}_{amb} + 1{,}666) \times (Z - 549{,}514)}{V_{cons} \times NH \times (T_{utiliz} - T_{rede})} \times$$

$$\times (Z^2 - 200{,}486 \times Z + 64830{,}04) -$$

$$- \frac{0{,}1608813912 \times \bar{I}^2 \times \bar{\eta}o^2 \times A^2}{{V_{cons}}^2 \times NH^2 \times (T_{utiliz} - T_{rede})^2} +$$

$$+ \frac{1}{{V_{cons}}^2 \times NH^2 \times (T_{utiliz} - T_{rede})^2} \times (1{,}234051200 \times 10^{-15} \times K^2 \times (\bar{T}_{amb} - 100)^2 \times$$

$$\times A^2 \times (-0{,}01 \times \bar{T}_{amb} + 1{,}666)^2 \times (Z - 549{,}514)^2 \times (Z^2 - 200{,}486 \times Z + 64830{,}04)^2) +$$

$$+ \frac{0{,}01144058028 \times \bar{I}^3 \times \bar{\eta}o^3 \times A^3}{{V_{cons}}^3 \times NH^3 \times (T_{utiliz} - T_{rede})^3}$$

Para um sistema a ar e temperatura de utilização de 80℃ (4.19)

$$f = \frac{0{,}8427586207 \times \bar{I} \times \bar{\eta}_0 \times A}{V_{cons} \times NH \times (T_{utiliz} - T_{rede})} -$$

$$- \frac{5{,}3820 \times 10^{-8} \times K \times (\bar{T}_{amb} - 100) \times A \times (-0{,}01 \times \bar{T}_{amb} + 1{,}666) \times (Z - 549{,}514)}{V_{cons} \times NH \times (T_{utiliz} - T_{rede})} \times$$

$$\times (Z^2 - 200{,}486 \times Z + 64830{,}04) -$$

$$- \frac{0{,}1044087396 \times \bar{I}^2 \times \bar{\eta}o^2 \times A^2}{{V_{cons}}^2 \times NH^2 \times (T_{utiliz} - T_{rede})^2} +$$

$$+ \frac{1}{{V_{cons}}^2 \times NH^2 \times (T_{utiliz} - T_{rede})^2} \times (1{,}282042080 \times 10^{-15} \times K^2 \times (\bar{T}_{amb} - 100)^2 \times$$

$$\times A^2 \times (-0{,}01 \times \bar{T}_{amb} + 1{,}666)^2 \times (Z - 549{,}514)^2 \times (Z^2 - 200{,}486 \times Z + 64830{,}04)^2) +$$

$$+ \frac{0{,}005055140124 \times \bar{I}^3 \times \bar{\eta}o^3 \times A^3}{{V_{cons}}^3 \times NH^3 \times (T_{utiliz} - T_{rede})^3}$$

Neste momento todas as equações dependem exclusivamente de variáveis básicas e directas. Deste modo, será possível fazer a sua introdução no código computacional desenvolvido no âmbito deste trabalho. Para as temperaturas intermédias de utilização da água quente, o código realiza uma operação de interpolação.

4.2 Validação das equações desenvolvidas

Tendo em vista a validação das equações atrás apresentadas, foram escolhidas algumas situações que serão analisadas recorrendo a três metodologias de cálculo. Pretende-se então comparar os valores obtidos através das equações aqui desenvolvidas, com os valores obtidos por cálculo manual com observação de gráficos e tabelas, e ainda pelo programa Solterm. Nas Tabelas 3 e 5, são apresentados os dados referentes às duas situações analisadas.

Tabela 3- Caso 1: Dados de entrada

Localidade:	Vila Real
Temperatura da água de consumo:	60^{o}C
Temperatura da água da rede:	15^{o}C
Volume consumido por habitante por dia:	40l
Número de habitantes:	4
Volume do depósito:	200l
Área total de colectores:	4m^2
Resistividade térmica:	8 $W/m^2/K$
Rendimento óptico:	80%
Energia do sistema de apoio:	Gás Natural [0,85$€/m^3$]

Tabela 4- Caso 1: Resultados

	Processo manual	Solterm	Modelo
Fracção solar f	0,71	0,66	0,65

Tabela 5- Caso 2: Dados de entrada

Localidade:	Vila Real
Temperatura da água de consumo:	40^{o}C
Temperatura da água da rede:	15^{o}C
Volume consumido por habitante por dia:	60l
Número de habitantes:	2
Volume do depósito:	300l
Área total de colectores:	2m^2
Resistividade térmica:	8 $W/m^2/K$
Rendimento óptico:	80%
Energia do sistema de apoio:	Gás Butano [1,38$€/m^3$]

Tabela 6- Caso 2: Resultados

	Processo manual	Solterm	Modelo
Fracção solar f	0,91	0,81	0,88

Analisando os dados da Tabela 4, podemos verificar que a diferença entre os valores obtidos pelo procedimento desenvolvido no âmbito deste trabalho e pelo Solterm apresenta uma diferença de 1,5% e comparativamente com o processo manual, uma diferença de 9,2. Para o caso 2, Tabela 6, a mesma comparação resulta numa diferença de 7,9% e comparativamente com o processo manual a diferença é de 3,4%. De um modo geral as equações da fracção solar anteriormente expostas, apresentam uma diferença média de 5,5%.

Podemos já concluir que existem diversos factores que afectam a fracção solar de um sistema, tais como a temperatura de utilização da água de consumo, o número de habitantes do imóvel, volume consumido por habitante por dia e ainda o volume do depósito. Se analisarmos o caso 2 comparativamente com o caso 1, vemos que, apenas o facto de a temperatura de utilização da água de consumo ser mais baixa no caso 2 do que no caso 1 e o volume do reservatório ser maior no caso 2 do que no caso1, é suficiente para aumentar a fracção solar de um sistema. Para demonstrar o "peso" destes dois factores (T_{utiliz}, Z), no caso 2, foram em simultâneo alterados desfavoravelmente outros dois factores, aumentou-se o volume consumido por habitante por dia e diminuiu-se a área de colectores. Mesmo assim este segundo caso apresenta uma melhor fracção solar comparativamente ao primeiro.

4.3 Conclusões

Podemos desde já concluir que o modelo matemático desenvolvido permite um processo de cálculo mais rápido, comparativamente ao método de cálculo manual. Deste modo consegue-se uma maior funcionalidade e eficácia no dimensionamento de sistemas solares térmicos.

Verifica-se também, que a temperatura de utilização da água e o volume do reservatório, são dois factores muito significativos no cálculo da fracção solar de um sistema desta natureza.

Capítulo 5

Programa “SolarEnergy”

Conteúdo do capítulo

Neste capítulo é descrito o processo de desenvolvimento do código computacional. É apresentada a sua estrutura e o seu funcionamento, ao mesmo tempo que são explicados os conceitos base para o seu funcionamento e a legislação que lhe dá suporte.

5.1 Introdução

Querendo ir de encontro a todo o esforço de dinamização e desenvolvimento que tem vindo a ser feito relativamente ao crescente aproveitamento da energia solar, é de todo relevante a construção de novos sistemas e o aperfeiçoamento de metodologias que possibilitem uma melhor utilização desta fonte de energia renovável.

O “SolarEnergy” é um programa informático que segue esta mesma filosofia global e pretende ser uma ferramenta para suprimir estas necessidades no que ao correcto dimensionamento diz respeito. O programa permite de uma forma expedita fazer o dimensionamento de um sistema solar térmico para um determinado cenário de utilização. Pretende também ser uma alternativa para o cálculo de todos os parâmetros envolvidos no dimensionamento de um projecto desta ordem, inclusive da própria fracção solar *f*, sem que seja necessário recorrer a métodos de cálculo pouco rigorosos (análise gráfica), e muito demorados.

5.2 Programa "SolarEnergy"

O programa "SolarEnergy" foi desenvolvido recorrendo à linguagem Visual Basic. Consiste num modelo matemático que permite realizar uma análise específica de soluções solares térmicas para casos concretos com grande rapidez e fiabilidade.

Dada a dificuldade de explicar um programa de tal natureza, optou-se pela construção de esquemas visuais representados nas Figuras 28 e 29, através das quais é possível visualizar o fluxo de informação do programa e o seu princípio de funcionamento.

Ao mesmo tempo irá ser feita uma descrição mais detalhada de cada módulo, sendo possível deste modo, ter uma maior percepção das capacidades e funcionalidades do programa. Na Figura 28, é representado um esquema sucinto do princípio de funcionamento do programa desenvolvido, através do qual é possível ter uma primeira abordagem do software. Também é possível ter uma melhor percepção da mecânica de construção, que foi tida em conta aquando da sua construção.

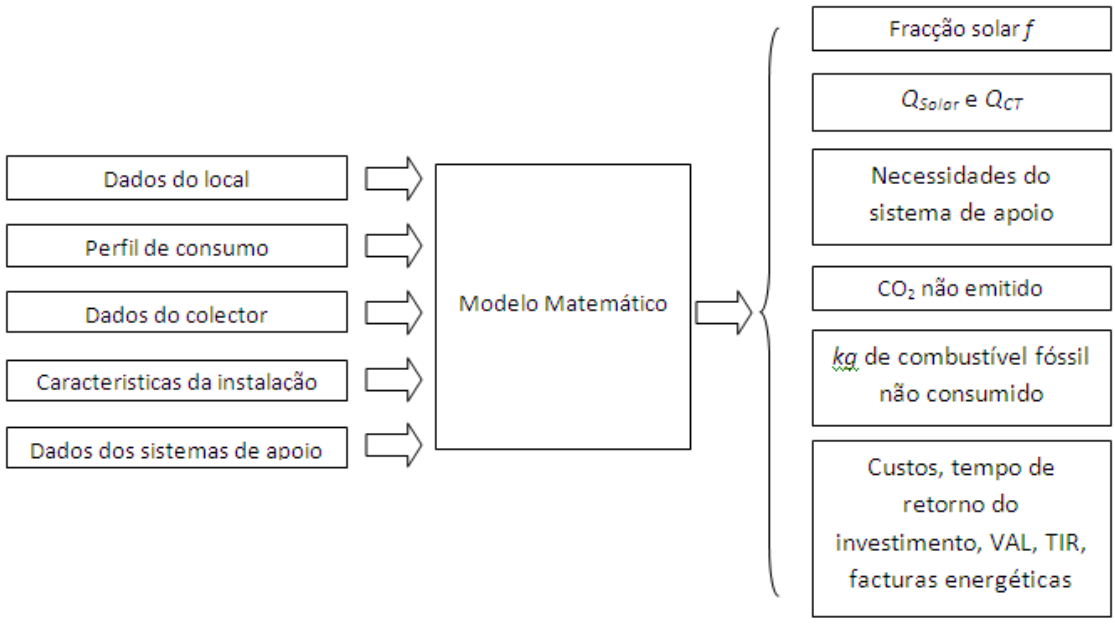
Dados do local
Perfil de consumo
Dados do colector
Caracteristicas da instalação
Dados dos sistemas de apoio
Modelo Matemático
Fracção solar f
Q_{Solar} e Q_{CT}
Necessidades do sistema de apoio
CO_2 não emitido
kg de combustível fóssil não consumido
Custos, tempo de retorno do investimento, VAL, TIR, facturas energéticas

Figura 28- Diagrama de blocos representativo do modelo matemático desenvolvido

Na Figura 29, está descrita a estrutura básica do programa, sendo possível verificar de que modo ocorre o funcionamento do mesmo.

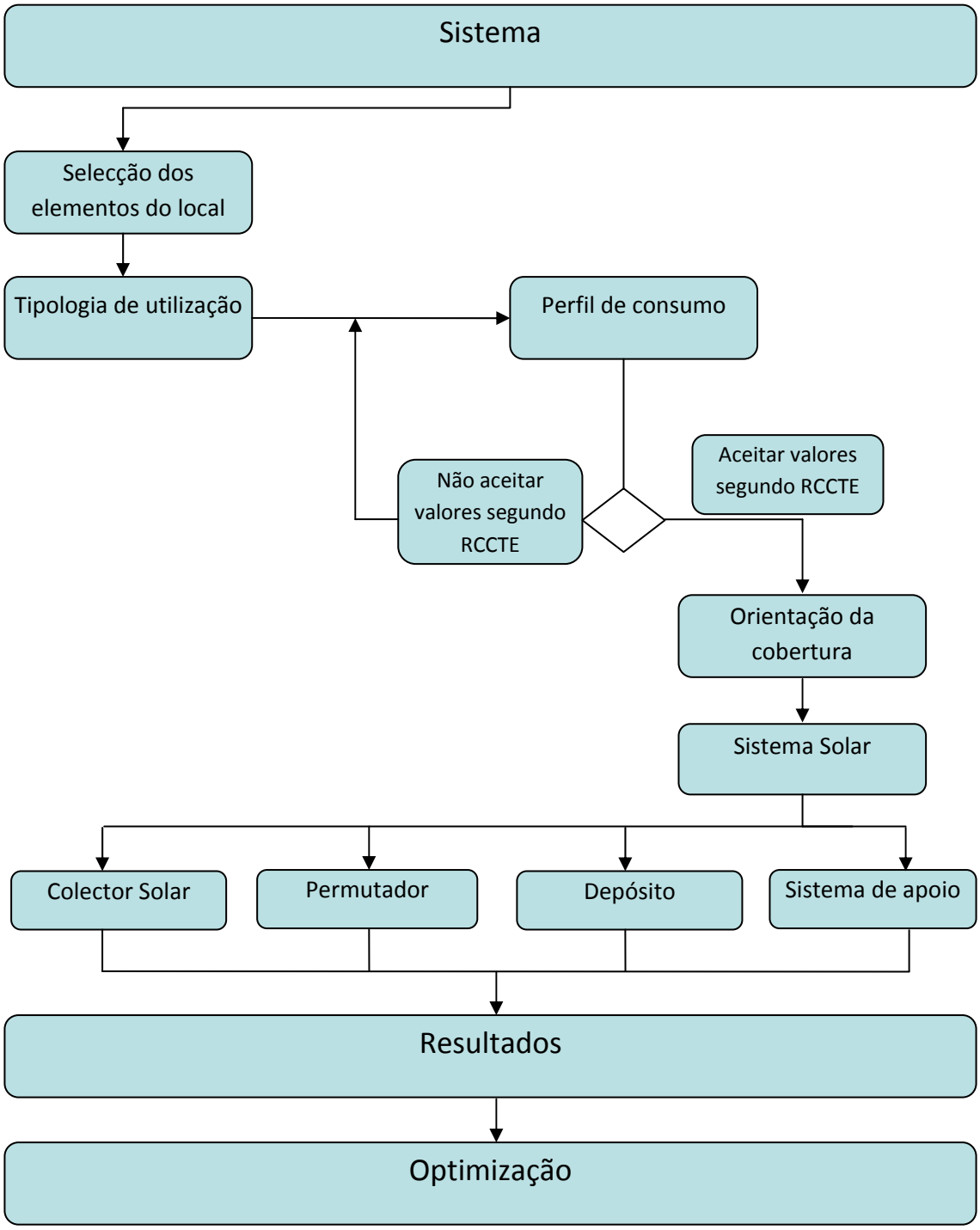

Figura 29- Esquema representativo da estrutura do programa desenvolvido

O programa está dividido em três grandes partes (Sistema, Resultados, Optimização). A primeira parte, designada por Sistema, é onde o utilizador introduz todos os dados referentes à localização, perfil de consumo e particularidades dos equipamentos. A bem dizer, nesta secção o utilizador introduz toda a informação

necessária para o programa determinar os parâmetros de utilização da energia solar. Na segunda parte, Resultados, é a secção do programa onde são apresentados os resultados. É aqui que o programa apresenta as respostas do modelo matemático e faz um julgamento acerca da viabilidade da aplicação de um sistema solar para o cenário definido. A terceira e última parte, designada por Optimização, tem como objectivo fazer a optimização das condições de funcionamento do sistema. Isto é, utilizar os valores obtidos na secção Resultados, e trabalha-los de modo a conseguir um maior ajuste às condições especificadas e a uma melhor relação custo/beneficio. Este aumento, será explicado com mais pormenor no final deste capítulo.

Iremos então passar à apresentação propriamente dita e explicação detalhada do funcionamento do programa. Pretende-se que esta secção do trabalho funcione como um manual do utilizador do software desenvolvido.

Ao iniciar o programa, aparece uma primeira imagem, Figura 30, a qual tem um carácter introdutório, para avançar, o utilizador tem de clicar sobre a imagem.

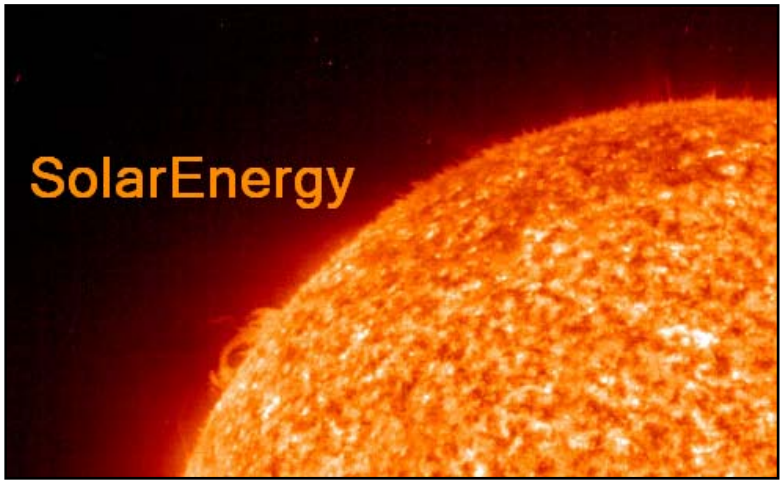

Figura 30- Imagem inicial do programa

Antes de dar inicio à explicação do código que resulta da implementação do modelo computacional, é de todo importante explicar de que modo está organizada a informação. Na Figura 31 é possível verificar 3 áreas de trabalho distintas. A área de trabalho 1, designada por área de verificação, serve para o utilizador verificar quais os *campos* que já preencheu, correctamente à medida que o utilizador avança no programa. A área 2, é designada por área de trabalho, através da qual o utilizador introduz os dados requeridos e onde também são apresentados os respectivos resultados. Aqui o utilizador

deve clicar na barra superior deste campo para avançar para a *janela* seguinte, depois de ter obtido o *visto* na área de verificação. A área 3 é designada por, área operacional, na qual o utilizador faz a selecção dos três módulos de trabalho (Sistema, Resultados, Optimização), note-se que o utilizador deve começar a utilização do programa sempre na opção *sistema*, e apenas comutar para a opção resultados quando o próprio programa o indicar.

Então, após a introdução ao programa, Figura 30, surge a primeira *janela,* Figura 31, referente à tipologia de utilização, na qual o utilizador terá de especificar qual o tipo de utilização do sistema a ser dimensionado (doméstico, industrial e serviços). Dado que a legislação em vigor sobre a obrigatoriedade da instalação de painéis solares está mais direccionada para o sector doméstico, apenas este se encontra em funcionamento, remetendo-se assim o sector industrial e o de serviços para trabalho futuro.

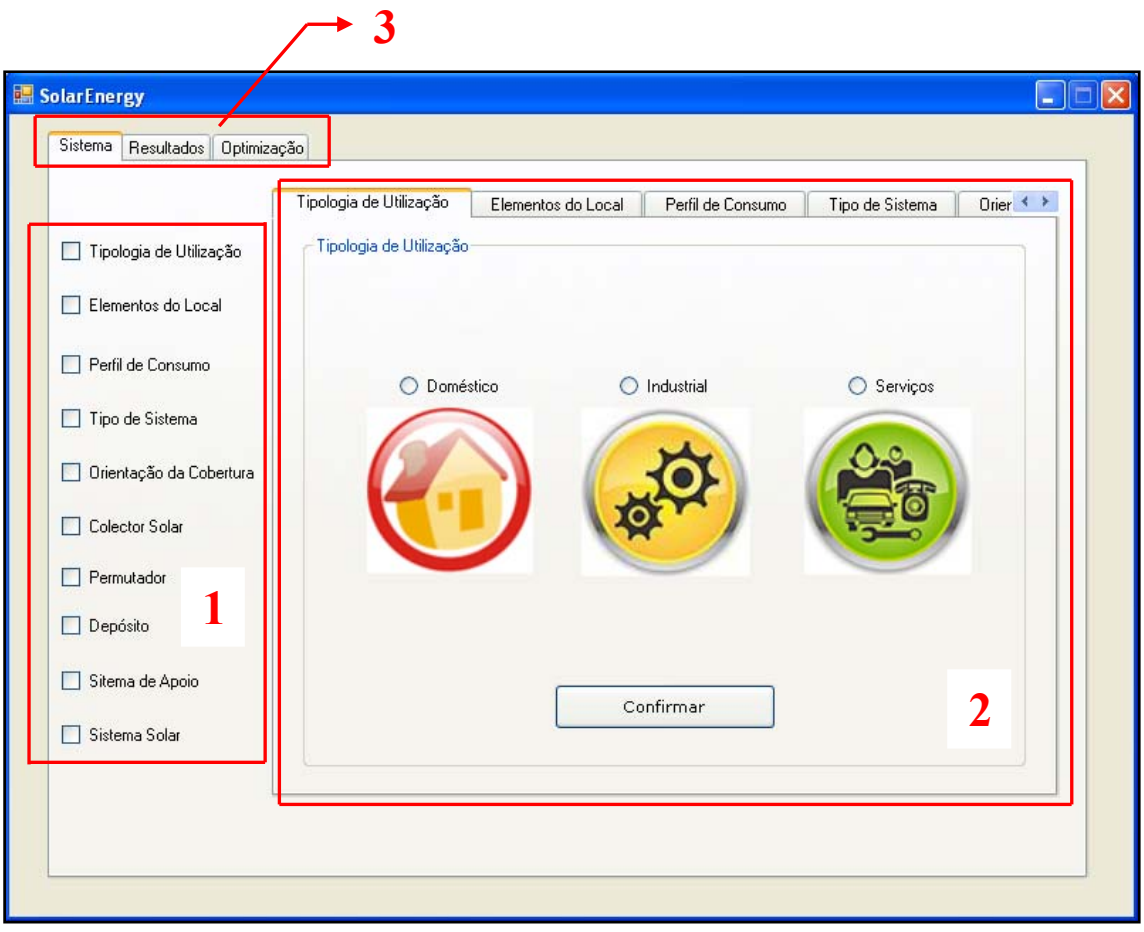

Figura 31- Tipologia de utilização

É de salientar que à semelhança da *janela* anterior, nas seguintes será necessário premir o botão *Confirmar/Continuar*. Deste modo sempre que uma determinada secção esteja preenchida, aparece um visto na régua do lado esquerdo da *janela* e deste modo o utilizador consegue ter uma melhor noção do desenvolvimento do dimensionamento. Após a selecção da tipologia e ter-se premido no botão *confirmar*, irá surgir o sinal de que esta secção está completamente preenchida e pode passar-se à fase seguinte, *Elementos do Local.* Nesta segunda *janela*, representada na Figura 32, o utilizador deve seleccionar a localidade pretendida, para isso deve escrever o nome da localidade no respectivo campo, ou então fazer o "scroll" na lista apresentada. Ao fazer esta selecção de imediato o programa apresenta a altitude, latitude, longitude, temperaturas médias ambiente e radiação média para cada mês do ano para a localidade pretendida. Esta operação é possível uma vez que o programa recorre a uma base de dados elaborada para este fim, com todos estes valores para todas as localidades de Portugal. Para a realização desta base de dados recorreu-se à página da internet da "European Commission, DG- Joint Research Center, Institute for Environment and Sustainability, Renewable Energies Unit" (http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/).

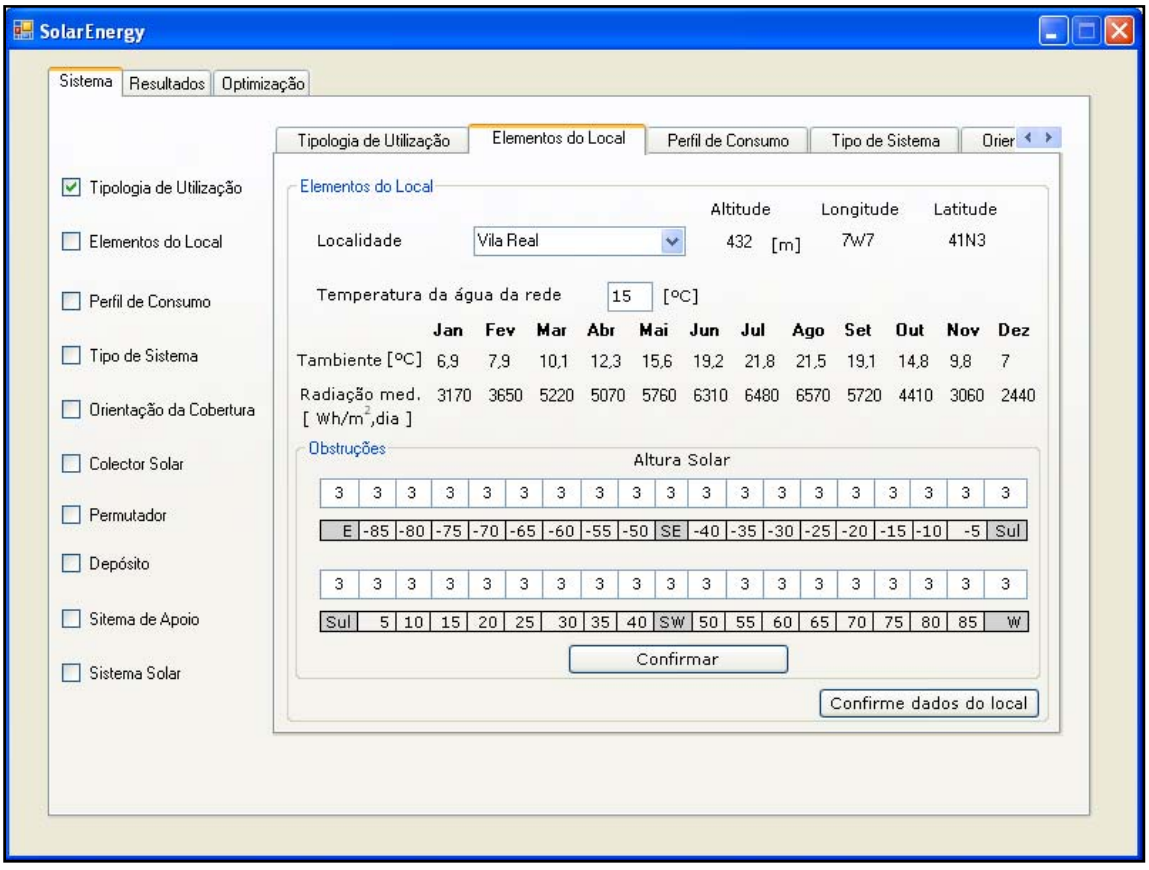

Figura 32- Elementos do local

Ainda nesta *janela* aparece a temperatura da água de rede que por defeito assume o valor de 15*ºC* (valor considerado para efeitos de cálculo pelo RCCTE), mas pode ser alterada pelo utilizador para outro valor que o próprio considere mais adequado. Passando para a parte das obstruções estas representam a quantidade de energia que o colector solar não irá receber num determinado período do dia, sempre que haja um obstáculo físico entre este e o Sol. Para compreender melhor este assunto está representada na Figura 33, uma carta solar.

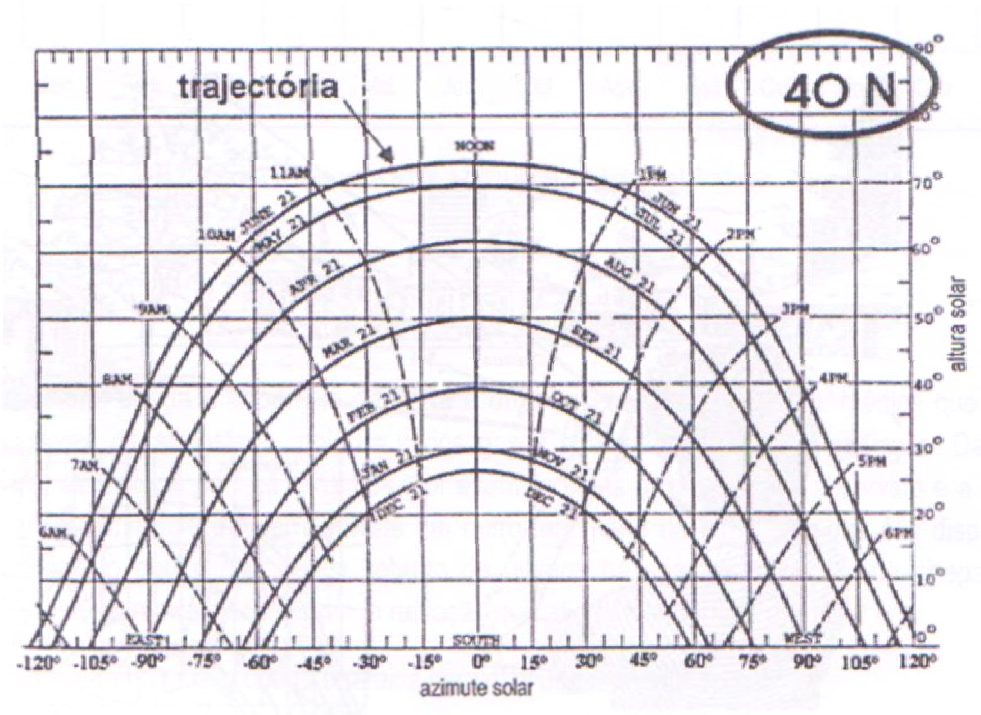

Figura 33- Carta solar 40ºN

As cartas solares descrevem o movimento do Sol (coordenadas), ao longo do dia para várias alturas do ano e serve para determinar sombreamentos e insolações. As cartas solares são feitas para diferentes valores de latitude. Através de cartas desta natureza, quando existe um sombreamento, é possível ver o tempo em que o colector solar não irá receber qualquer tipo de radiação, resultante da obstrução provocada por um determinado objecto, sendo possível deste modo descontar o valor da radiação não incidente.

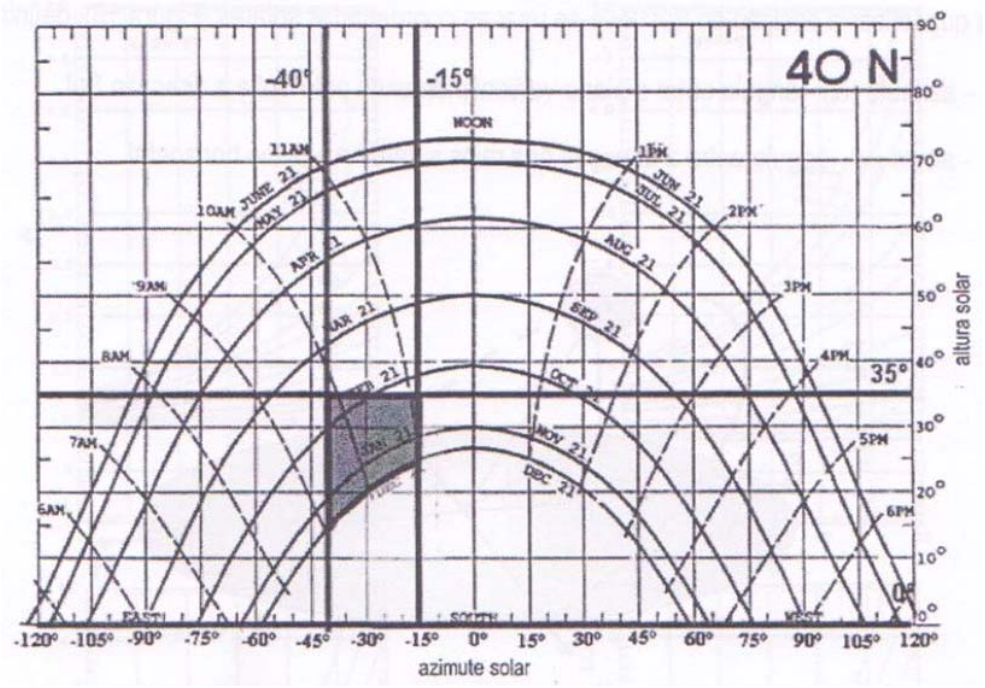

Figura 34- Carta solar 40ºN com obstrução

Na Figura 34, está representada uma situação em que existe um sombreamento entre os azimutes *-40º* e *-15º* e atinge uma altura solar de *35º*. A zona a sombreado representa todo o período solar em que ocorre o sombreamento pelo que a respectiva radiação deve ser descontada nos cálculos do sistema solar. Através da análise de uma carta solar, Figura 34, é possível verificar que uma superfície vertical orientada a Sul recebe mais radiação no Inverno do que no Verão, bem como uma superfície vertical orientada para Norte só recebe radiação solar no Verão. E ainda que uma superfície horizontal recebe mais radiação solar durante o Verão, uma vez que a altura Solar neste período é maior. Note-se que dadas as diferentes latitudes e longitudes de todo o território nacional, a incidência e o trajecto do movimento aparente do sol variam de local para local. Este facto faz com que haja necessidade da elaboração de cartas solares para diversas latitudes, logo a análise para um determinada situação deve ser feita com base na carta solar desse mesmo local.

Então, introduzindo os valores de obstrução e confirmando a informação, vai passar-se à introdução do *perfil de consumo*, Figura 35. O utilizador terá de introduzir alguns dados tais como, temperatura da água de consumo, número de ocupantes da habitação, bem como o consumo admitido por ocupante por dia. Este consumo aparece por defeito no

programa com um valor de 40*l/dia*, uma vez que é o valor mínimo estabelecido segundo o Decreto-Lei 80/2006 de 4 Abril, (RCCTE).

Através do botão *Ver,* o programa calcula os litros de água de consumo da habitação por dia. Ainda nesta *janela* o utilizador deve detalhar qual o consumo diário, como é que o consumo de água quente é distribuído ao longo do dia. O utilizador terá ainda de especificar se o perfil de consumo é igual para o fim-de-semana. Caso contrário terá de o especificar.

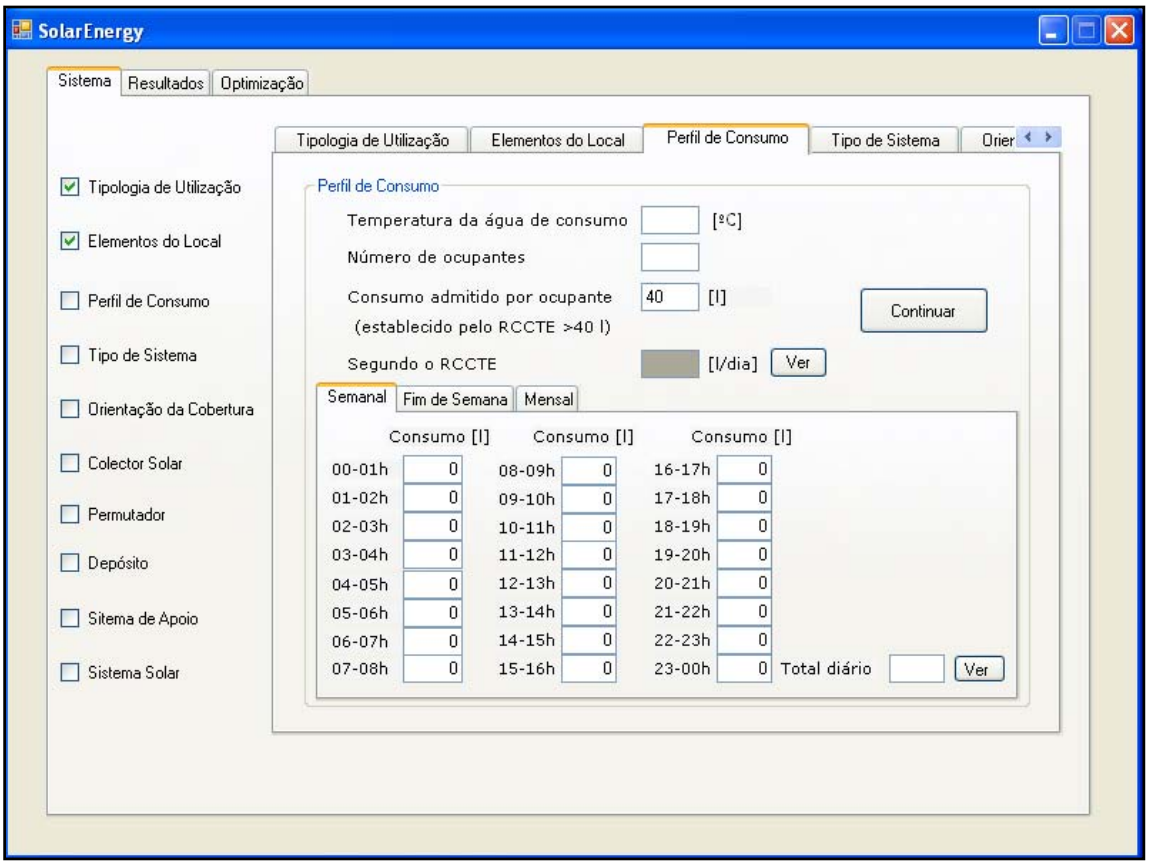

Figura 35- Perfil de consumo

Clicando no botão *Ver* do lado inferior direito, aparece o total diário em litros do consumo detalhado. Importa referir que se este valor for inferior ao estipulado no RCCTE, aparece uma mensagem de aviso, Figura 36, na qual é solicitado ao utilizador que defina um novo perfil horário e que cumpra os mínimos estipulados no regulamento em vigor.

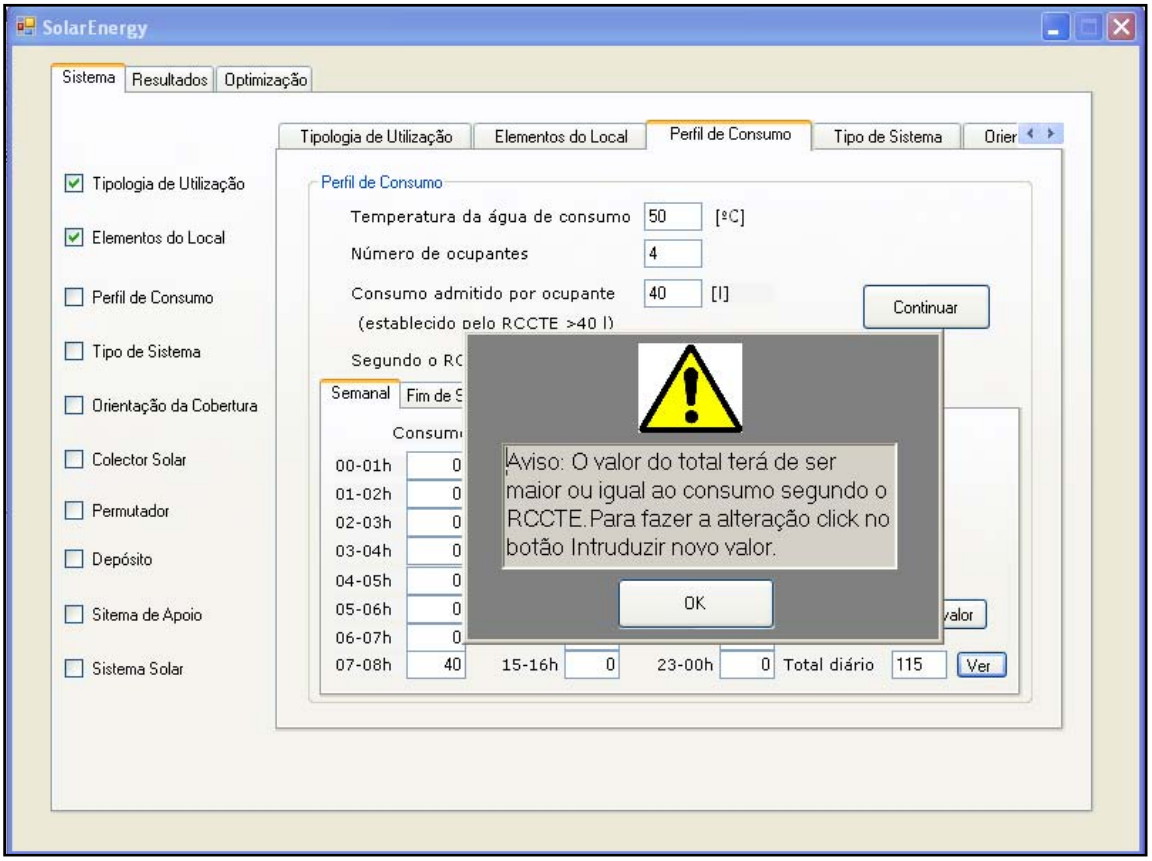

Figura 36- Perfil de consumo com mensagem de aviso

A *janela* seguinte, representada na Figura 37, refere-se ao tipo de sistema a utilizar: sistema de depósito pressurizado ou kit doméstico. A solução do depósito pressurizado é caracterizada pelo facto de existir uma bomba hidráulica de circulação eléctrica, a qual é responsável por fazer a circulação forçada do fluído entre o colector solar e o depósito. Esta solução é comum em aplicações nas quais o depósito de acumulação de água não fique localizado no exterior da habitação (telhado), sendo necessária a bomba hidráulica para vencer as diferenças de pressões. No caso do kit doméstico este não possui qualquer equipamento auxiliar (bomba hidráulica) no circuito de ligação entre o colector e o depósito de acumulação, uma vez que o depósito se localiza no exterior da habitação junto do colector solar. Deste modo a circulação do fluído de trabalho é feita por termossifão, isto é, origina-se uma corrente convectiva devida à diferença de densidades entre fluídos a diferentes temperaturas. Sendo a corrente convectiva originada, suficiente para vencer as diferenças de pressões.

É ainda de salientar que a existência de uma bomba de circulação irá contribuir para o consumo de energia e por conseguinte ter-se-á em conta no estudo da viabilidade.

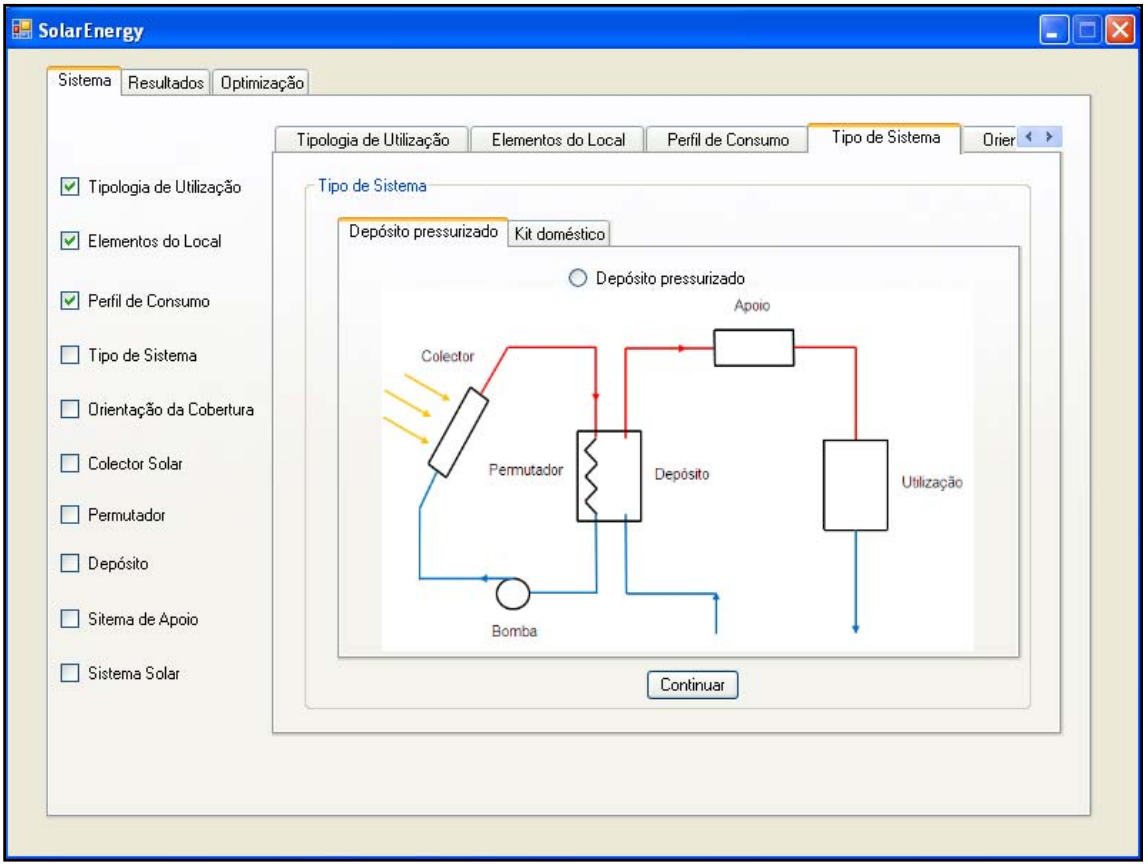

Figura 37- Tipo de sistema solar

A fim de seleccionar o *Tipo de Sistema* pretendido, à semelhança do sucedido nos *painéis* anteriores deve ser confirmada a intenção do utilizador utilizando o botão *Continuar*.

Segue-se então um outro *painel*, intitulado de *Orientação da Cobertura*, Figura 38. Neste *painel* é apresentado o ângulo óptimo no qual o colector solar deve ser instalado, de modo a receber a máxima quantidade de radiação solar. Este ângulo assume o valor em graus medido a partir do horizonte até ao plano em que o colector é instalado. O valor deste ângulo varia consoante a localidade na qual o sistema vai ser instalado (devido às diferentes latitudes dos locais). Para isso foi necessário criar uma base de dados auxiliar ao programa, que forneçe o ângulo óptimo de acordo com a localidade seleccionada no *painel Elementos do local*. Ainda neste mesmo *painel* deve ser feita, caso exista a correcção da orientação da cobertura. É sabido que os colectores solares, de modo a ser retirado o maior proveito, devem ser instalados segundo a orientação Sul. Isto é, se a vertente do telhado da casa na qual irá ser instalado o colector solar tiver algum desfasamento com a direcção Sul, deve ser introduzido neste *painel* de modo a poder ser descontado o valor da radiação solar resultante deste facto.

Sendo este desfasamento medido em graus a partir da direcção Sul até à direcção do plano de instalação do colector solar. Por definição no programa aparece a direcção Sul, o que significa que não há desfasamento, logo o ângulo é assumido como tendo o valor zero. Embora toda a estrutura do programa esteja desenvolvida, a afectação da radiação por estes desvios, não se encontra em funcionamento, tendo sido remetido para trabalho futuro.

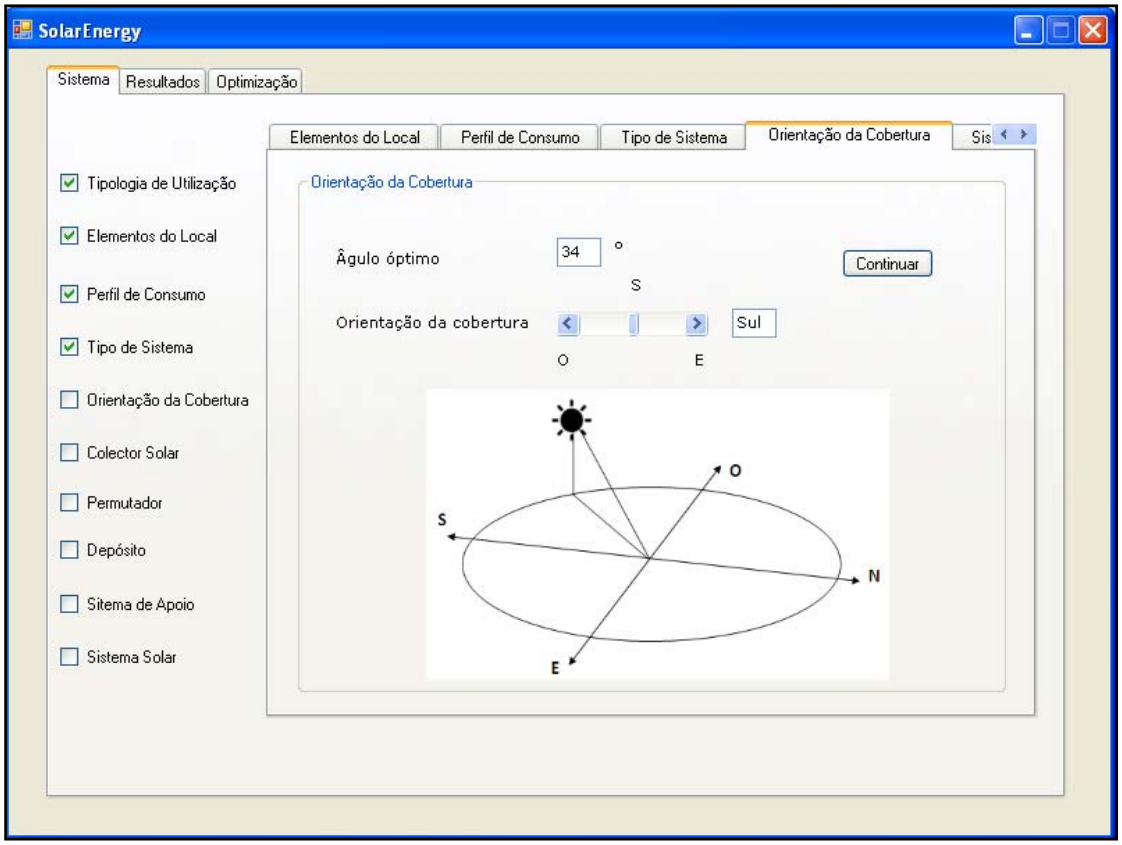

Figura 38- Orientação da cobertura

De seguida passamos então para a parte do *sistema*, que contempla as seguintes *janelas*: *Colector Solar*, *Permutador*, *Depósito* e *Sistema de Apoio*.

A *janela* seguinte, denominada por *Colector Solar*, Figura 39, tem como objectivo apresentar todos os dados e características referentes ao colector solar. Nesta *janela* existe um campo intitulado *Tipo de Colector* através do qual se pretende que o utilizador seleccione um colector da lista apresentada. Para isso foi elaborada uma base de dados que contem alguns modelos de colectores solares disponíveis no mercado.

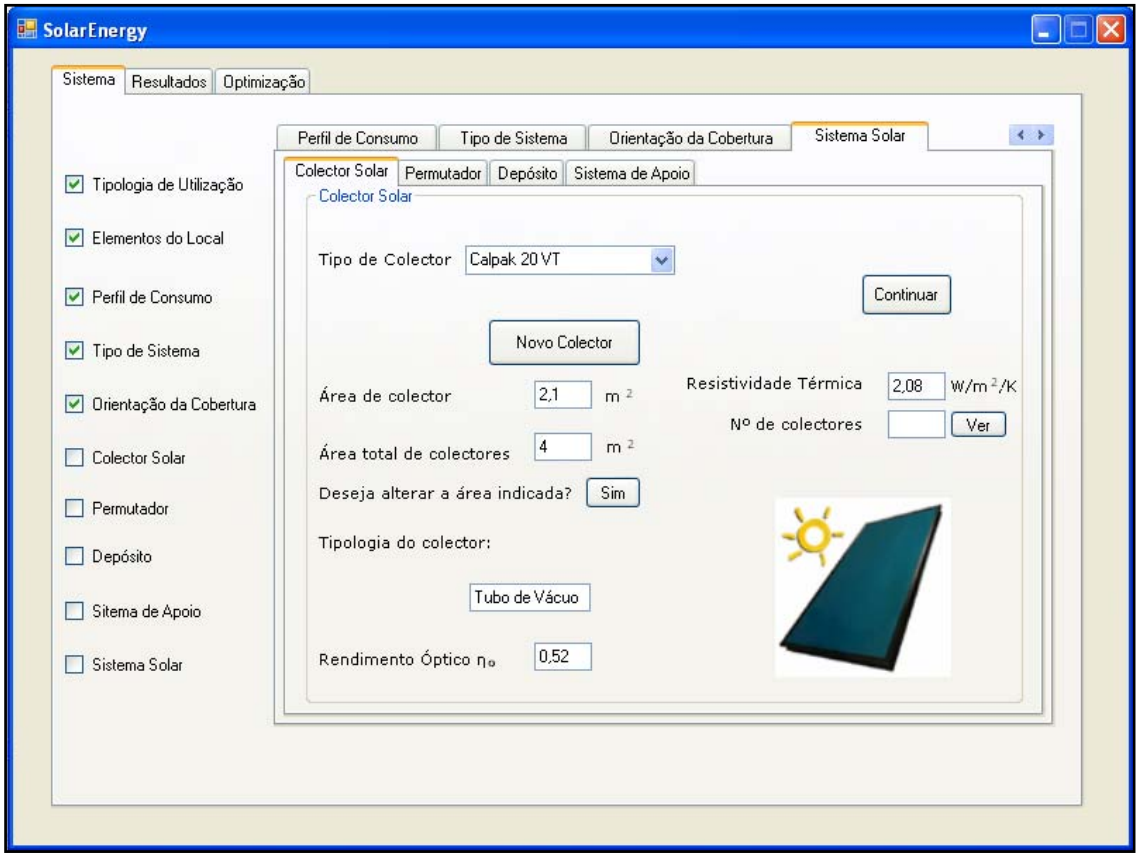

Figura 39- Colector solar

Ao ser seleccionado um determinado modelo de colector, automaticamente o programa mostra todas as suas características, tais como: área do colector, tipologia (tubos de vácuo, CPC ou plano), rendimento óptico e resistividade térmica.

O programa calcula a área total em m^2 de colectores, a qual é directamente proporcional ao número de ocupantes da habitação, $1m^2$ de colector solar por cada ocupante da habitação, (estipulado por Decreto-Lei). Se o utilizador desejar uma área total diferente da indicada, deve responder afirmativamente a pergunta *Deseja alterar a área indicada?,* bastando para isso premir o botão *Sim* e introduzir a área pretendida. Ao premir o botão *Ver* é apresentado o número de colectores necessários para a aplicação definida. Caso o utilizador não encontre base de dados o colector desejado, este pode ser introduzido. Neste caso o utilizador deve clicar no botão *Novo Colector* e introduzir as características do colector pretendido, Figura 40. A partir deste momento o programa irá fazer o cálculo de acordo com as características indicadas.

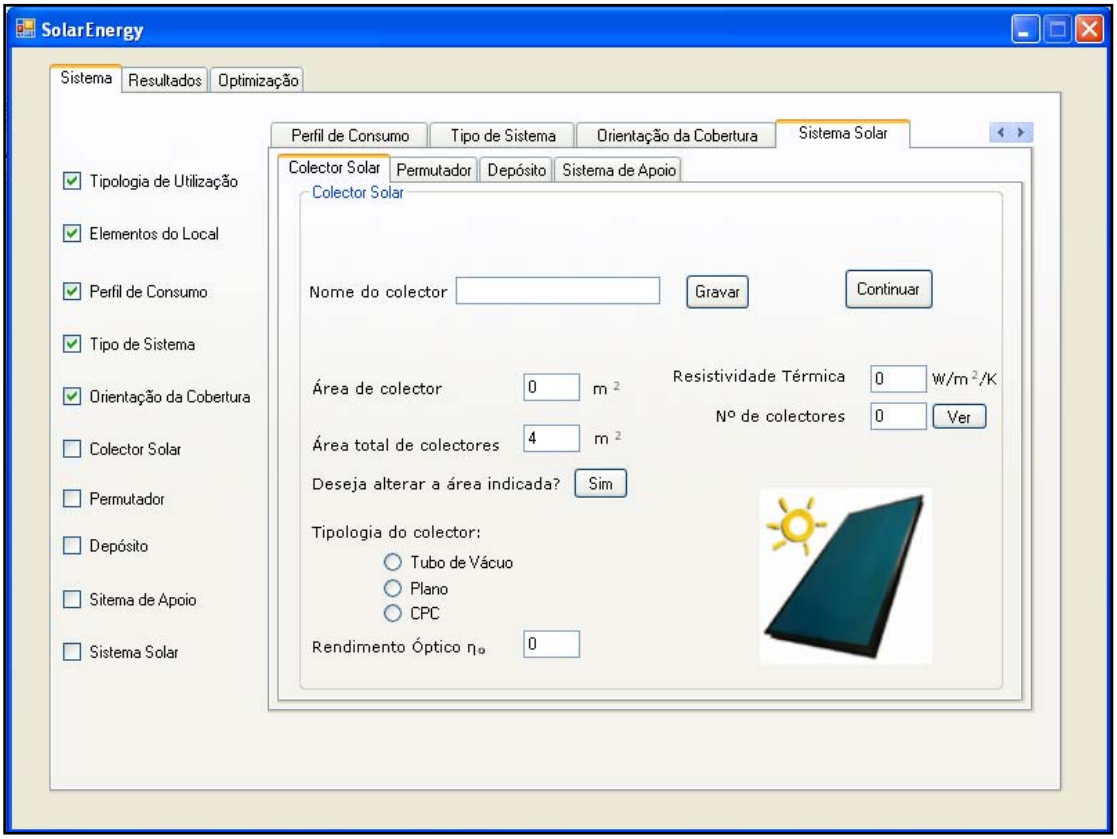

Figura 40- Opção novo colector

Na Figura 41, está representada a *janela Permutador*. Aqui o utilizador deve escolher qual o tipo de permutador que pretende para a sua instalação. O programa apresenta três soluções: permutador de camisa, serpentina e externo.

Consoante o tipo de sistema que se deseja instalar, deve-se escolher o permutador ideal, uma vez que todos os tipos têm as suas vantagens e desvantagens. No caso do permutador de camisa este é constituído por dois cilindros, um dos quais "recebe" o fluído proveniente do painel solar, e o outro alberga a água quente que irá ser utilizada, dando-se a troca de calor através da própria parede do cilindro interno.

No caso do permutador de serpentina, como o próprio nome indica este possui no interior do cilindro/reservatório, uma serpentina, pela qual circula o fluído a elevada temperatura proveniente do colector solar. O resto do interior do reservatório é preenchido por água quente para utilização. A troca de calor dá-se através da parede da serpentina. O terceiro tipo, permutador externo, é composto por dois reservatórios independentes e separados fisicamente. As trocas de calor efectuam-se em duas etapas distintas. Num primeiro reservatório, através de serpentinas, efectua-se a troca de calor entre o fluído do colector solar e água já com alguma temperatura. De seguida ocorre a

segunda etapa da troca de calor. A água proveniente do primeiro reservatório entra directamente no segundo reservatório onde se mistura com a água já existente, provocando assim o seu aumento de temperatura. Esta é a água que irá ser utilizada para os serviços de águas quentes sanitárias. O utilizador deve ainda introduzir o valor da eficiência térmica do equipamento seleccionado para a instalação.

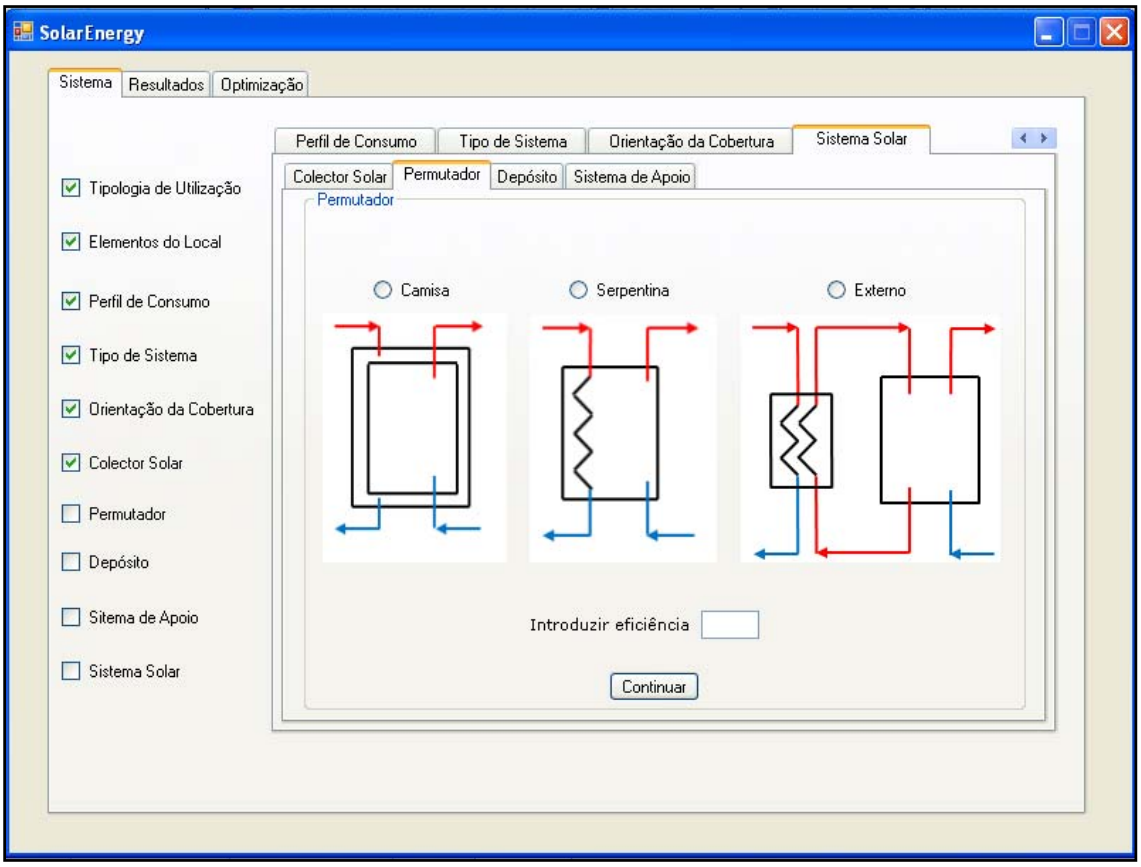

Figura 41- Características do permutador

Ao fim de seleccionar o permutador em questão, o utilizador passa para a *janela* seguinte, designada por *Depósito*, Figura 42. Por defeito, o depósito seleccionado tem a capacidade de 200*l*, mas espera-se que, à semelhança do que fez na situação do *Colector Solar*, o utilizador seleccione um dos depósitos típicos presentes na base de dados. Ao fazer a selecção, aparece de um modo automático as características do depósito seleccionado, tais como, volume, área externa, coeficiente de perdas térmicas, material de construção, posição de instalação e localização do depósito. Todas estas características influênciam o dimensionamento do sistema solar uma vez que alteram

parâmetros como, a quantidade de calor transmitida e eficiência do sistema. Por estes motivos, deve ser feita uma análise cuidada no momento de selecção deste tipo de equipamento. Este pensamento deve ser partilhado também para o colector solar, permutador e para o sistema de apoio o qual irá ser abordado mais à frente.

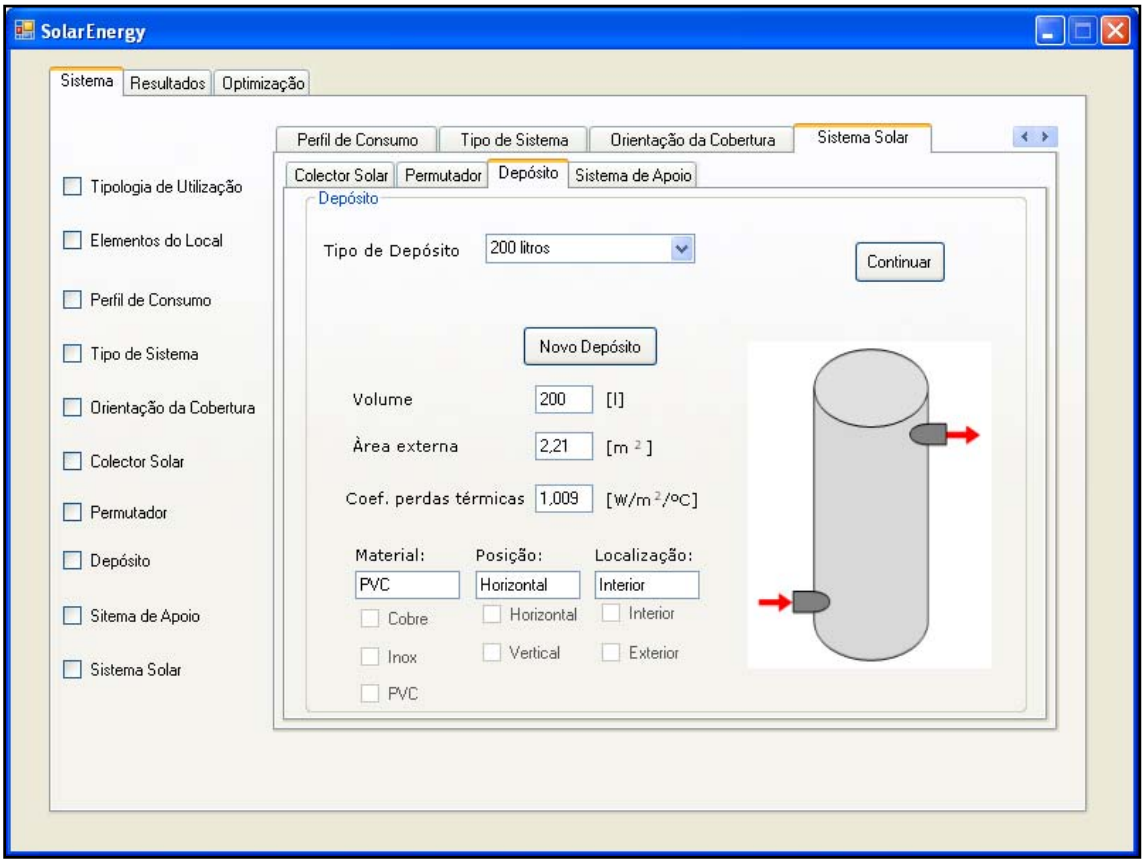

Figura 42- Características do depósito

Se o utilizador pretender um depósito que não está contemplado na lista, isto é, com características diferentes, nomeadamente a capacidade de acumulação de água, ele próprio pode especificar as características do depósito, para tal basta utilizar o botão *Novo Depósito*, Figura 43, e introduzir as respectivas características.

Após a introdução das características o utilizador deve prosseguir o dimensionamento, premindo o botão *Gravar* e posteriormente o botão *Continuar*.

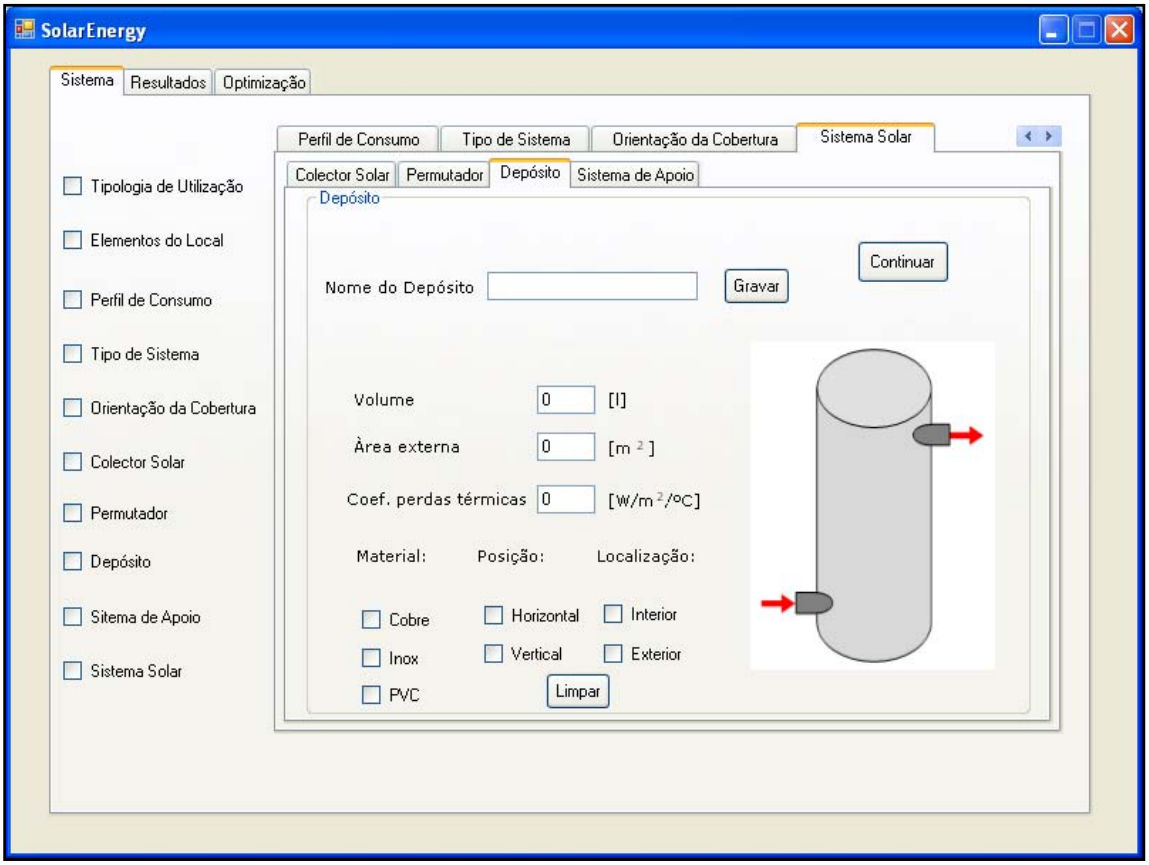

Figura 43- Opção de novo depósito

Para terminar o Sub-capítulo do *Sistema Solar* é necessário o preenchimento da *janela* designada por *Sistema de Apoio*, Figura 44. É do nosso conhecimento que o sistema solar por si só não é capaz de suportar todas as necessidades térmicas ao longo do ano. Se no Verão o sistema solar consegue fornecer 100% das necessidades e por vezes até mais, nos meses de Inverno, apenas consegue dar resposta a uma parte destas necessidades. Deste modo, é necessário um sistema de apoio que forneça a restante energia necessária.

Na *janela, Sistema de Apoio*, o utilizador deve indicar qual o tipo de equipamento/fonte de energia que irá servir de complemento ao sistema solar, assim como o custo em euros por unidade de energia auxiliar e ainda a eficiência do equipamento em questão. Após indicação destes parâmetros e utilizando o botão *continuar*, irá aparecer a seguinte mensagem, *A secção do Sistema está completa, passe para a secção dos resultados fazendo um click no canto superior esquerdo*. Neste momento a secção *Sistema* encontra-se completa.

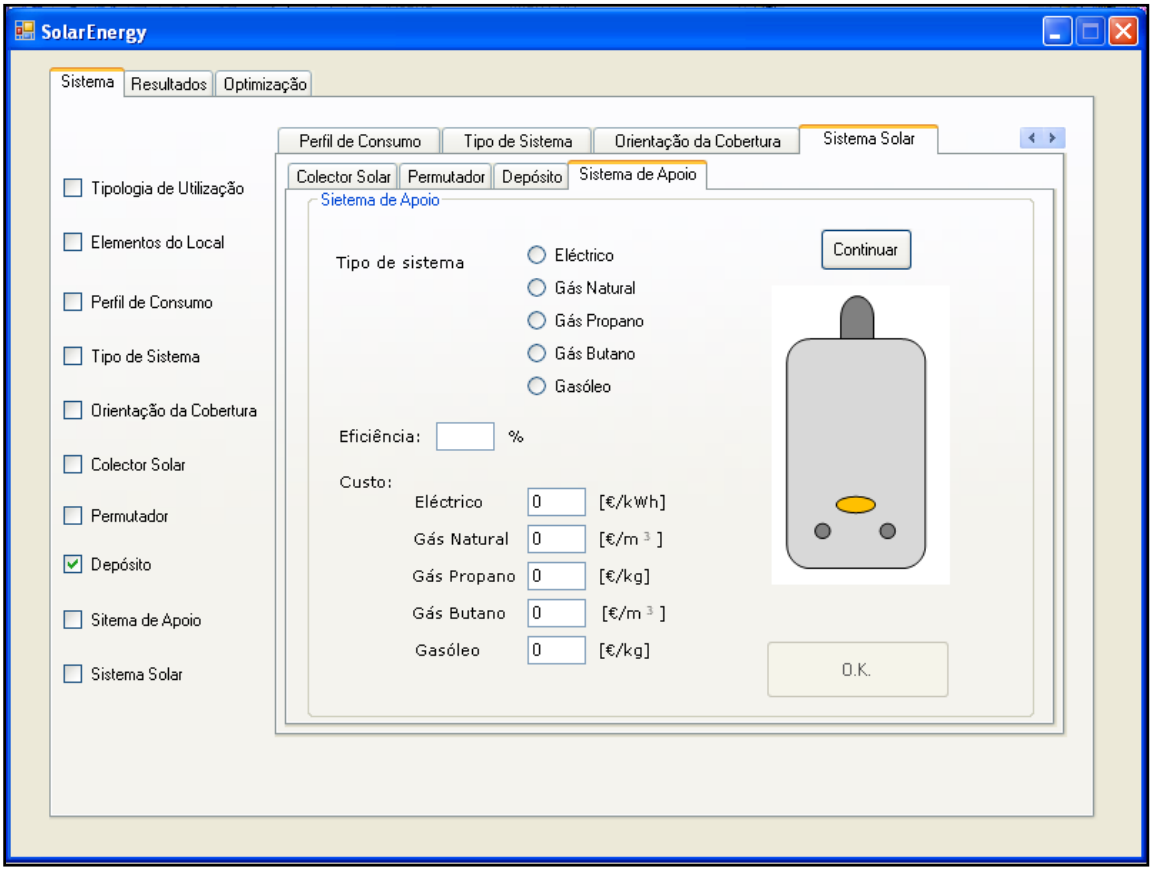

Figura 44- Sistema de apoio energético

Deve-se então seguir a instrução da mensagem de modo a dar continuidade ao dimensionamento do sistema solar passando para a janela *Resultados*.

No *painel* dos resultados, Figura 45, são apresentados todos os cálculos efectuados pelo programa, entre os quais, a fracção solar do sistema, o tempo de retorno do investimento, indicadores económicos, benefícios ambientais, factura energética e ainda é feita uma avaliação da viabilidade económica do projecto.

Nesta última janela, o utilizador ainda terá de introduzir alguns dados, os quais não foram solicitados durante o dimensionamento, por não se achar conveniente, como é o caso do custo do *kWh* eléctrico ou o valor dos incentivos à instalação solar. Neste *painel* o utilizador deve seguir uma ordem de execução pré estabelecida, a qual está representada pela numeração dos campos de preenchimento, como se pode verificar através da Figura 45. Aqui o utilizador deve começar por obter o valor da *Fracção Solar* premindo o botão *Actualizar Valores*. Neste passo, o programa irá calcular a fracção solar através das equações desenvolvidas e representadas no capítulo 4.

De seguida passa-se para o *painel* do *Payback* onde lhe é apresentada a energia fornecida pelo sol através do colector solar e a carga térmica anual. Neste painel deve ser indicado o custo do *kwh* eléctrico em euros, o qual é tido em conta no caso dos sistemas solares em que a circulação é feita com recurso a uma bomba hidráulica eléctrica (circulação forçada). Deve ser indicado também quanto tempo, em horas, é que o sistema solar trabalha por dia.

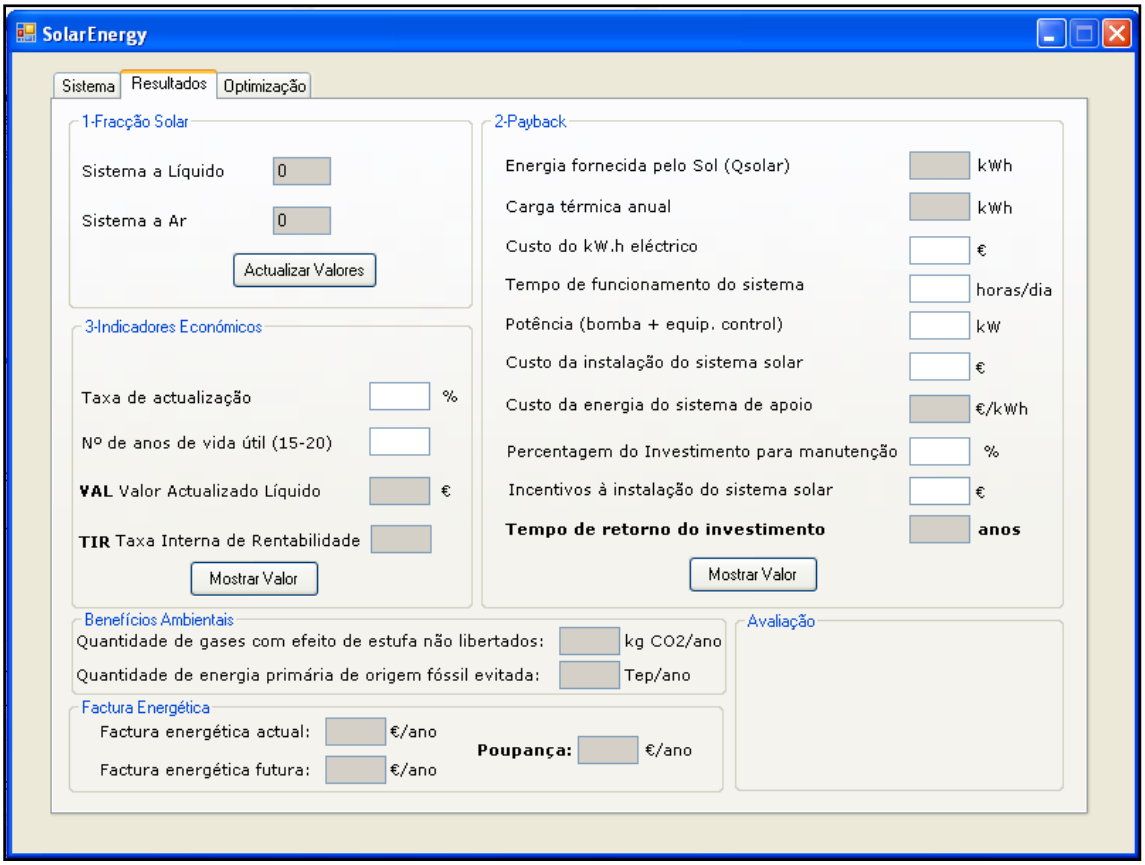

Figura 45- Resultados

Relativamente ao parâmetro *Potência* este é referente ao total da potência eléctrica em *kW*, da bomba hidráulica (caso o sistema seja de circulação forçada), equipamento de controlo (abertura e fecho de válvulas) e equipamento de monitorização das temperaturas do sistema, entre outros.

O utilizador deve também introduzir o valor total do custo do sistema solar em euros. Este valor deve ser o somatório dos custos de todos os equipamentos do sistema bem como o custo de instalação e mão-de-obra. Não devem ser incluídos neste custo o valor referente à manutenção do sistema solar, uma vez que existe um campo específico

onde é solicitado, ao utilizador, que defina qual a percentagem do investimento total que se destina à manutenção do sistema. Importa referir que o valor da percentagem do investimento total destinado para este custo por norma ronda os 2%. Por último ainda no painel do *Payback*, aparece um campo referente aos incentivos à instalação do sistema solar. Neste campo pretende-se que o utilizador introduza o valor em euros dos incentivos monetários (ver secção 2.3), que irá receber do estado por instalar o sistema solar em questão. Neste momento, de modo a obter o tempo de retorno do investimento, o utilizador deve clicar no botão *Mostrar Valor* no *painel* do *Payback*. Este cálculo tem na sua base a equação abaixo apresentada, Equação 5.1;

$$Payback = \frac{I_{nvt} - I_{nct}}{R - C} \tag{5.1}$$

onde I_{nvt} é o investimento total em euros, I_{nct} é o valor dos incentivos em euros, R são as receitas proporcionadas pela utilização do sistema em euros e C os custos do funcionamento do sistema. As receitas e os custos são calculados pelas seguintes expressões:

$$R = Q \times f \times d \tag{5.2}$$

onde o Q é a carga térmica anual em *kWh*, f é a fracção solar do sistema e o d são os custos da energia do sistema de apoio em *€/kWh*.

$$C = \left(t \times P \times 365\right) \times b \tag{5.3}$$

em que t é o tempo em horas de funcionamento do sistema, P é a potência eléctrica total dos sistemas de apoio em *kWh* e b é o custo do *kWh* eléctrico em euros.

Passando para o *painel*, *Indicadores Económicos* é necessário preencher o campo da *taxa de actualização*. Esta taxa é também conhecida por custo de oportunidade do capital, ou ainda por taxa mínima de rentabilidade do projecto. Exprime a rentabilidade que o investidor exige para implementar o projecto de investimento e serve para actualizar o "*cash-flow*" gerado pelo mesmo. Por norma, é

costume considerar a taxa de actualização igual à taxa de juro do mercado (2 a 4%). Ainda neste *painel* o utilizador deve indicar o tempo de vida útil do equipamento, o qual deve rondar os 15 a 25 anos, segundo dados fornecidos pelos fabricantes. Neste momento, ao clicar no botão *Mostrar Valores*, o programa calcula o VAL e a TIR do projecto. Importa referir que o VAL é o Valor Actualizado Líquido, este indicador permite-nos avaliar o lucro actualizado ao ano de referência e determina-se com recurso à seguinte equação;

$$VAL = -I + (R - C) \times \left[\frac{(1+a)^{n-1}}{a \times (1+a)^{n}} \right] \tag{5.4}$$

onde, I é o investimento total em euros descontado do montante dos incentivos, R são as receitas em euros, C são os custos em euros do funcionamento do sistema, a é a taxa de actualização e n é o tempo de vida em anos do projecto.

A TIR é a Taxa Interna de Rentabilidade, e permite determinar a taxa que o investidor obtém em média em cada ano sobre os capitais que se mantêm investidos no projecto, enquanto o investimento inicial é recuperado progressivamente. A TIR é a taxa de actualização do projecto fazendo VAL =0. Calcula-se através da seguinte equação;

$$0 = -I + (R - C) \times \left[\frac{(1+TIR)^{n-1}}{TIR \times (1+TIR)^{n}} \right] \tag{5.5}$$

onde, I, R, C e n, assumem o mesmo significado que têm na expressão do VAL.

Através do VAL e da TIR consegue-se ter uma noção da viabilidade do projecto em questão. É com base nestes dois indicadores económicos que o programa faz a avaliação da viabilidade do sistema dimensionado, mostrando uma mensagem ao utilizador, no canto inferior direito (*painel*, *Avaliação*), referente à avaliação económica do projecto. Se o valor calculado do VAL for inferior a zero, então o programa apresenta a seguinte mensagem, *Para as condições especificadas o projecto não apresenta viabilidade económica*, caso o VAL seja maior do que zero então, *Para as condições especificadas o projecto apresenta viabilidade económica*. Embora seja apresentada pelo programa esta avaliação económica, é necessário ter em conta que é

uma indicação meramente informativa, cabendo ao utilizador/investidor tomar a sua própria decisão através dos dados calculados pelo programa.

Passando para o *painel* dos *Benefícios Ambientais*, o utilizador tem acesso a informações relativas ao impacto que a utilização deste sistema solar irá provocar no meio ambiente. Deste modo o programa calcula e apresenta a quantidade de CO_2 *(kg/ano),* que não é libertada para a atmosfera, bem como a quantidade de energia primária medida em *Tep* (Toneladas equivalentes de petróleo), que não serão consumidas, caso seja implementado o sistema solar em questão. Por último o programa faz ainda um balanço relativo à factura energética antes e depois da aplicação do sistema solar. Assim, apresenta o valor em euros que o utilizador gasta anualmente para suprir as suas necessidades energéticas e o valor futuro que o utilizador irá pagar após a instalação do sistema solar. Daqui, facilmente é possível extrair o valor da poupança anual em euros que o utilizador irá ter ao longo do tempo de vida útil do sistema solar. Este valor é apresentado ao utilizador no painel *Factura Energética*. Importa, por último, referir que todos os cálculos realizados são efectuados a partir da fracção solar a líquido. Esta situação é justificada pelo facto dos sistemas solares para águas quentes sanitárias de uso doméstico serem deste tipo.

A última secção do programa, refere-se à optimização do sistema. Nesta secção pretende-se optimizar o dimensionamento efectuado para o sistema solar. Depois de ter sido realizado todo um trabalho de avaliação e cálculo relativo às condições de trabalho e características do sistema solar, pretende-se nesta secção, levar em conta determinados aspectos que podem estar a penalizar o desempenho ou mesmo inviabilizar a implementação do sistema solar. Neste *painel* pretende-se abordar três situações passivas de serem corrigidas com algumas alterações nas condições de desenvolvimento do dimensionamento.

1. Quando existe desperdício de energia solar;

Esta situação existe nos meses de Verão em que a capacidade de produção de energia do sistema solar é superior às necessidades energéticas da habitação. Numa situação deste tipo, existem dois factores que podem contornar a situação. O utilizador pode aumentar a capacidade do depósito/reservatório de água quente ou diminuir a área de painéis previamente estabelecida. Pretende-se então no *painel* da *Optimização* ir alterando estes

factores de modo a encontrar uma melhor relação entre eles, tendo em vista diminuir o desperdício de energia.

2. Quando a fracção solar, *f*, é muito reduzida;

Numa situação deste tipo tem que se identificar o motivo de tal situação, uma vez que se a fracção solar apresenta um baixo valor, devido a sombreamentos. Este facto é difícil de ser contornado uma vez que implica a remoção de árvores ou outros edifícios subjacentes. Se o motivo pelo qual a fracção solar apresenta um baixo valor for outro que não este, então é possível de ser optimizado. A optimização pode ser feita fazendo o aumento da área do colector solar, melhorando o isolamento e aumentando o volume do depósito/reservatório, ou ainda melhorar a inclinação e orientação do colector solar.

3. Quando o "Payback" é muito elevado;

Este facto pode ser justificado de várias formas. A fracção solar pode ser muito baixa e neste caso deve ser feita a optimização acima mencionada. O consumo pode não estar de acordo com os valores indicados no RCCTE, sendo necessário reajustar o perfil horário de consumo, temperaturas de consumo bem como os caudais circulantes. Ou ainda a situação em que o painel seleccionado é desadequado para o presente dimensionamento, seja pelo preço demasiado elevado ou por ter muitas perdas.

Pretende-se então cruzar esta informação com os diversos factores de modo a optimizar o dimensionamento realizado, tendo em vista alcançar a melhor solução possível para um determinado perfil de consumo e condições de funcionamento. Este complemento do programa embora se encontre idealizado ainda não está concebido, sendo remetida para trabalho futuro por questões de tempo de execução.

5.3 Conclusões

A utilização do código computacional apresentada neste capítulo permite ao utilizador fazer o dimensionamento rápido e eficaz de um sistema solar térmico. Permite de uma forma rápida e simplificada fazer a alteração dos parâmetros de entrada, simulando várias situações de utilização do sistema. Esta versatilidade permite ao projectista encontrar a melhor solução técnica/económica fazendo o estudo de diferentes

cenários. Desta forma, será possível encontrar a melhor solução sob o ponto de vista da eficiência do sistema, viabilidade económica e não menos importante, a viabilidade ambiental.

Capítulo 6

Casos de estudo

Conteúdo do capítulo

Neste capítulo pretende-se fazer uma demonstração prática do programa desenvolvido através da simulação de sistemas solares para casos reais. Pretende-se fazer uma comparação dos valores obtidos, com os valores obtidos através do cálculo manual (método *f-chart*) e os valores obtidos pelo software Solterm 5.0 desenvolvido pelo INETI (Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação).

6.1 Apresentação dos Casos de Estudo

Para que seja possível uma avaliação imparcial serão analisados 5 casos de estudo. De caso para caso, alteram-se alguns dos parâmetros de "entrada", Tabela 7 tendo em vista avaliar as alterações dai resultantes. Toma-se por referência o *caso 1* e todas as alterações feitas e resultados obtidos são referentes a este caso.

Note-se que os casos em que não há alteração dos valores são representados por "-"; para todos os outros são apresentados os valores das alterações.

Nas tabelas seguintes são enumeradas as variáveis avaliadas para cada um dos casos e os respectivos resultados fornecidos por cada um dos métodos. Optou-se por fazer a simulação, para todos os casos, utilizando sempre a mesma localização do imóvel (Vila Real), a mesma temperatura da água da rede e o mesmo colector solar.

Tabela 7- Descrição dos casos de estudo

Caso	$T_{utiliz}[^{o}C]$	$V_{cons}[l]$	NH	$Z[l]$	$A[m^2]$	*Sist. Apoio*	*Viabilidade*
Caso1	60	40	4	200	4	Gás Natural	Sim
Caso2	-	-	2	-	2	Gás Propano	-
Caso3	50	-	3	-	3	Gás Butano	-
Caso4	40	60	2	300	2	Gás Butano	-
Caso5	-	-	-	-	-	Gás Natural	Não

6.2 Caso de estudo 1

Neste primeiro caso, tentou-se fazer a aproximação a uma situação representativa das situações existentes em Vila Real.

Este caso é designado por *caso de referência*, como tal todas as comparações dos restantes casos serão feitas tendo em conta os resultados aqui obtidos. Optou-se então por escolher um imóvel localizado na cidade de Vila Real, com quatro habitantes. Foi cumprida a regra de no mínimo $1m^2$ por habitante assim como $40l$ por dia por habitante como define o regulamento. Uma vez que é uma cidade referenciada no RCCTE como tendo um Inverno da categoria I_3 (Inverno rigoroso), e um Verão V_2 (Verão intermédio), optou-se por considerar a temperatura de utilização da água de consumo igual a $60ºC$. A escolha do reservatório também foi baseada na situação comum em que é igual ao consumo diário em litros por habitante vezes o número de habitantes multiplicando por um factor de segurança de 1,2. Relativamente à fonte de energia do sistema de apoio, escolheu-se o Gás natural, considerando um custo de $0{,}85€/m^3$,uma vez que este se encontra disponível em Vila Real.

Podemos verificar que os valores relativos à fracção solar obtidos pelo *SolarEnergy* e pelo *Solterm* são muito próximos apresentando um desvio de 1,5%. Ficando ambos os valores aquém do obtido pelo processo manual. Já os valores da carga térmica anual, Q_{ct}, apresentam uma diferença mínima entre ambos. O Q_{solar}, por ser uma relação entre a fracção solar e a Q_{ct}, apresenta valores que variam na mesma ordem de grandeza.

Tabela 8- Dados de entrada para o caso de estudo 1

Localidade:	Vila Real
Temperatura da água de consumo:	60^{o}C
Temperatura da água da rede:	15^{o}C
Volume consumido por habitante por dia:	40l
Número de habitantes:	4
Volume do depósito:	200l
Área total de colectores:	4m^2
Resistividade térmica:	8 $W/m^2/K$
Rendimento óptico:	80%
Energia do sistema de apoio:	Gás Natural [0,85$€/m^3$]

. Relativamente ao VAL, este mostra diferenças notórias entre os diversos métodos de cálculo, uma vez que depende do tempo de retorno do investimento que por sua vez também apresenta a mesma tendência. Embora o Q_{CT}, tenha uma variação pequena, este valor é ampliado no cálculo do tempo de retorno, o que justifica a variação apresentada nos valores do VAL. O mesmo fenómeno é verificado no cálculo das equações do CO_2 evitado.

Tabela 9- Resultados caso de estudo 1

	Processo manual	Solterm	SolarEnergy
Fracção solar f	0,71	0,66	0,65
Q_{Solar} [kWh/ano]	2206	2070	1946
Q_{CT} [kWh/ano]	3107	3133	3011
Tempo de retorno invest. [anos]	14	20	16
VAL [euros]	1295,4	238	850,94
TIR [%]	6,7	2,9	5,4
Emissões evitadas [$kg\ CO_2$]	486	636	428
Viabilidade económica	Positiva	Positiva	Positiva

6.3 Caso de estudo 2

Neste segundo caso comparativamente com o *caso 1*, foram alterados o número de habitantes do imóvel, a área de colectores solares disponível e o tipo de fonte de energia do sistema de apoio, Tabela 2. Optou-se por fazer recurso ao gás propano como fonte do sistema de apoio.

Tabela 10- Dados de entrada para o caso de estudo 2

Localidade:	Vila Real
Temperatura da água de consumo:	60℃
Temperatura da água da rede:	15℃
Volume consumido por habitante por dia:	40l
Número de habitantes:	2
Volume do depósito:	200l
Área total de colectores:	2m^2
Resistividade térmica:	8 $W/m^2/K$
Rendimento óptico:	80%
Energia do sistema de apoio:	Gás Propano [2€/kg]

Verificou-se, ao fazer estas alterações que, os valores da fracção solar são praticamente idênticos, uma vez que embora a área de colectores disponível seja menor, também a carga térmica anual é menor (menos habitantes), acabando por anular o efeito provocado pela diminuição dos m^2 de colectores.

Relativamente ao tempo de retorno do investimento, este é inferior, Tabela11, uma vez que o investimento inicial é menor, isto porque a área de colectores também é menor, alem de que o butano apresenta um preço por kWh superior ao gás natural.

Conclui-se que o tempo de retorno do investimento é proporcional à área de colectores instalada. O VAL aumenta substancialmente pelo mesmo motivo, isto é, quanto mais cara for a energia do sistema, maior é a viabilidade deste tipo de sistemas.

Tabela 11- Resultados *caso 2*

	Processo manual	Solterm	SolarEnergy
Fracção solar f	0,75	0,64	0,64
Q_{Solar} [kWh/ano]	1165	998	973
Q_{CT} [kWh/ano]	1554	1567	1524
Tempo de retorno invest. [anos]	7	10	8
VAL [euros]	3435	2779	2614
TIR [%]	13	7,8	9,6
Emissões evitadas [$kg\ CO_2$]	165	307	138
Viabilidade económica	Positiva	Positiva	Positiva

As emissões de CO_2 evitadas diminuíram uma vez que são directamente proporcionais ao Q_{solar} , que por sua vez diminui quando a Q_{CT} diminui (assumindo a fracção solar constante).

6.4 Caso de estudo 3

Para este caso, tenta-se mostrar a importância da temperatura de utilização da água, no cálculo da fracção solar. Para isso optou-se por diminuir $10^{o}C$ a este valor passando a T_{utiliz} assumir o valor de $50^{o}C$, Tabela 12. É ainda avaliada a relevância de um número de habitantes impar, no cálculo do número de anos de retorno do investimento, VAL e TIR. É de notar que a maioria dos colectores solares disponíveis no mercado, possui uma área de aproximadamente $2m^2$.

Analisando os valores da fracção solar apresentados neste caso, Tabela 13, com os verificados no *caso 1*, verifica-se que existe um aumento significativo. Esta diferença é devida à diminuição da temperatura da água de consumo, T_{utiliz}.

Embora se tenho optado por uma fonte do sistema de apoio favorável (para a viabilidade económica), uma vez que o custo kWh do gás butano é elevado quando comparado com o do gás natural, obtiveram-se valores de tempo de retorno do investimento elevados, assim como um baixo valor do VAL e da TIR. Este facto é justificado pelo número de habitantes impar.

Tabela 12- Dados *caso 3*

Localidade:	Vila Real
Temperatura da água de consumo:	50^{o}C
Temperatura da água da rede:	15^{o}C
Volume consumido por habitante por dia:	40l
Número de habitantes:	3
Volume do depósito:	200l
Área total de colectores:	3m^2
Resistividade térmica:	8 $W/m^2/K$
Rendimento óptico:	80%
Energia do sistema de apoio:	Gás Butano [1,38€/m^3]

O número de habitantes impar, tem o inconveniente de elevar bastante o investimento total do sistema solar, uma vez que a maioria dos colectores solares presentes no mercado têm sensivelmente 2m^2 cada. Logo para satisfazer as necessidades térmicas são necessários pelo menos 3m^2. Dada a situação, pelo regulamento, têm de ser instalados 4m^2 de colector, o que agrava a viabilidade económica destes sistemas para esta situação. Neste caso seria aconselhável encontrar no mercado, colectores com uma área de sensivelmente 1,5m^2.

Tabela 13- Resultados *caso 3*

	Processo manual	Solterm	SolarEnergy
Fracção solar f	0,81	0,82	0,76
Q_{Solar} [kWh/ano]	1468	1502	1347
Q_{CT} [kWh/ano]	1812	1841	1778
Tempo de retorno invest. [anos]	11,3	15	12,4
VAL [euros]	2192	1715	1779
TIR [%]	8,2	5	6,6
Emissões evitadas [$kg\ CO_2$]	211	469	192
Viabilidade económica	Positiva	Positiva	Positiva

6.5 Caso de estudo 4

Para este caso diminuiu-se a T_{utiliz}, para $40℃$, aumentou-se o V_{cons}, para $60l$ por dia por habitante, $A = 4m^2$ pelo que se manteve-se a regra de cálculo da área dos colectores, sendo que $NH = 4$. Variou-se o volume do depósito, sendo que o depósito escolhido para esta situação é de $300l$ de capacidade. Por último à semelhança do *caso 3*, optou-se pelo gás butano como fonte de energia do sistema de apoio, Tabela 14.

Tabela 14- Dados *caso 4*

Localidade:	Vila Real
Temperatura da água de consumo:	$40℃$
Temperatura da água da rede:	$15℃$
Volume consumido por habitante por dia:	$60l$
Número de habitantes:	2
Volume do depósito:	$300l$
Área total de colectores:	$2m^2$
Resistividade térmica:	$8\ W/m^2/K$
Rendimento óptico:	80%
Energia do sistema de apoio:	Gás Butano [$1{,}38€/m^3$]

Neste caso verificou-se um aumento da fracção solar, Tabela 15, justificado principalmente pela diminuição da temperatura de utilização da água e ainda pelo facto do reservatório ser maior. Verificou-se que, estes dois factores juntos sobrepõem-se ao efeito negativo provocado pelo aumento do consumo de água por habitante por dia. Deste modo pode verificar-se por comparação com o *caso 3,* que a fracção solar aumenta significativamente quando se aumenta o volume do reservatório, já que no *caso 3,* também se tinha diminuído a temperatura de utilização da água e não se verificou um aumento tão acentuado da fracção solar.

Tabela 15- Resultados *caso 4*

	Processo manual	Solterm	SolarEnergy
Fracção solar *f*	0,91	0,81	0,88
Q_{Solar} [*kWh/ano*]	1178	1072	1112,7
Q_{CT} [*kWh/ano*]	1295	1331	1270
Tempo de retorno invest. [anos]	8,7	13	9,3
VAL [euros]	2213	1662	1982
TIR [%]	10,4	6,2	8,4
Emissões evitadas [*kg* CO_2]	167	334	158
Viabilidade económica	Positiva	Positiva	Positiva

6.6 Caso de estudo 5

Este caso foi especialmente criado para analisar a sensibilidade do comportamento económico do sistema solar, face ao tipo/custo da fonte de energia do sistema de apoio. Para tal, o único parâmetro alterado, foi exactamente o custo do gás natural, Tabela 16, mantendo-se todas as restantes variáveis inalteradas. Optou-se então por reduzir substancialmente o custo desta energia para 0,2*€/kWh*.

Tabela 16- Dados *caso 5*

Localidade:	Vila Real
Temperatura da água de consumo:	60*ºC*
Temperatura da água da rede:	15*ºC*
Volume consumido por habitante por dia:	40*l*
Número de habitantes:	4
Volume do depósito:	200*l*
Área total de colectores:	$4m^2$
Resistividade térmica:	8 $W/m^2/K$
Rendimento óptico:	80%
Energia do sistema de apoio:	Gás Natural [0,2*€*/m^3]

Deste modo, pela análise dos resultados obtidos, Tabela 17, podemos verificar, como seria de esperar, que todos os resultados que não dependem do custo da energia do sistema de apoio, como é o caso da fracção solar, Q_{solar}, Q_{CT}, e emissões de CO_2, não sofreram alteração, apresentando os mesmos valores obtidos para o *caso 1*. No entanto, os resultados financeiros como o VAL e o tempo de retorno do investimento, tornaram a implementação do sistema inviável.

Verificou-se então que o custo da energia do sistema de apoio é de extrema importância para a viabilidade económica deste tipo de sistemas, uma vez que, apenas alterando este factor consegue passar-se de uma situação economicamente viável para uma situação de inviabilidade económica.

Tabela 17- Resultados *caso 5*

	Processo manual	Solterm	SolarEnergy
Fracção solar *f*	0,71	0,66	0,65
Q_{Solar} [*kWh/ano*]	2206	2070	1946
Q_{CT} [*kWh/ano*]	3107	3133	3011
Tempo de retorno invest. [anos]	59,3	-	67,3
VAL [euros]	-1630	-3415	-1704
TIR [%]	-	-	-
Emissões evitadas [*kg* CO_2]	486	636	428
Viabilidade económica	Não tem	Não tem	Não tem

6.7 Conclusões

Após análise dos valores apresentados pelos casos de estudo, verifica-se que os resultados obtidos através do programa SolarEnergy e do Solterm, relativos à fracção solar *f*, são muito próximos, apresentando desvios na ordem dos 3,7%. Comparativamente com os valores obtidos através do método de cálculo manual, a diferença aumenta e o desvio obtido é de 7%. Mas considerando a mesma ordem de grandeza, isto é, a diferença entre um valor obtido pelo método manual e pelo programa SolarEnergy, é semelhante à obtida entre o método manual e o programa Solterm. Obtêm-se então uma diferença associada ao cálculo da fracção solar através das

equações desenvolvidas (programa SolarEnergy) de 5,5%. Acontece, deste modo, situações em que o programa SolarEnergy faz uma melhor aproximação aos valores obtidos pelo método de cálculo manual.

Relativamente ao valor da carga térmica anual Q_{CT}, os valores são muito homogéneos entre si, qualquer que seja o método de cálculo. No cálculo do VAL e da TIR os resultados obtidos pelos diferentes métodos apresentam algumas diferenças, as quais podem ser justificadas pelo chamado efeito de escala. Este efeito resulta do cálculo propriamente dito, uma vez que a pequena diferença observada entre os valores da fracção solar é ampliada pela fórmula do cálculo do VAL e da TIR, advindo daqui a diferença apresentada entre estes valores.

No que diz respeito ao número de anos para retorno do investimento, os valores entre o método manual e o *SolarEnergy* são menos díspares, sendo os valores apresentados pelo *Solterm* um pouco mais elevados.

Através do *caso 5,* tenta-se demonstrar a importância que o tipo de energia escolhida para o sistema de apoio tem na viabilidade económica dos sistemas solares térmicos. Entre o *caso 1* e o *caso 5,* a única alteração que é feita nos "parâmetros de entrada" é o custo do gás natural que alimenta o sistema de apoio. Pode constatar-se que uma diminuição acentuada do custo da energia pode tornar um investimento desta natureza sem viabilidade ecónomica. Podemos verificar que no *caso 1,* o projecto é economicamente viável e no *caso 5* não o é.

Relativamente ao valor das emissões de CO_2, estes apresentam alguma discrepância entre os vários métodos. Este facto pode ser justificado pelas condições de combustão consideradas por cada método.

Relativamente à importância do número de habitantes para o cálculo da fracção solar, através da análise do *caso 1* e do *caso 2* podemos ver que as únicas alterações aos "parâmetros de entrada" foram o número de habitantes do imóvel e o tipo da energia do sistema de apoio. Tendo em conta que este último factor não afecta o valor da fracção solar podemos justificar a diferença no valor obtido pela alteração do número de habitantes.

Capítulo 7

Conclusões e Trabalho Futuro

7.1 Conclusões

Tendo em conta todo o esforço e desenvolvimento que tem vindo a ser feito em torno dos sistemas de aproveitamento da energia solar, em particular no solar térmico, estamos ainda no inicio de uma longa caminhada na qual ainda temos muito que trabalhar. A tecnologia dos colectores solares tem muito por onde evoluir, começando pelo desenvolvimento de vidros selectivos de maior eficiência até ao desenvolvimento de isolantes para as tubagens e reservatórios mais eficazes. Existe toda uma rede de serviços e desenvolvimento tecnológico, que podem sem dúvida ser melhor explorados e devem constituir uma variável a ser equacionada pelo nosso tecido empresarial.

Nunca é de mais relembrar o Decreto-Lei 80/2006, o qual confere um carácter de obrigatoriedade à instalação de colectores solares térmicos para a produção de águas quentes sanitárias. Bem como todo o sistema de incentivos fiscais criados pelo Estado, tendo em vista ajudar e motivar a instalação deste tipo de sistemas.

É consensual que precisamos de mudar os nossos estilos de vida, no que diz respeito à proveniência e forma de uso da energia que consumimos. Todos os dias e a toda a hora, somos confrontados com as alterações climáticas que estão acontecer no nosso planeta devido a esta forma de viver.

A energia solar é uma das alternativas fortes para combater este flagelo e deve ser merecedora do nosso estudo e da nossa dedicação. Se por vezes surgirem dúvidas disso mesmo, basta pensarmos em todo o potencial que o sol tem, fonte de vida que é e o facto de que sem ele nada do que conhecemos seria possível de existir, e encontramos

de imediato a resposta para todas as reticências que possamos encontrar no nosso caminho.

Com o trabalho desenvolvido foi elaborado um modelo matemático para o dimensionamento de sistemas solares térmicos, o qual permite fazer o cálculo da fracção solar *f* de um colector através de um modelo matemático em linguagem Visual Basic, o qual tem por base as equações desenvolvidas e apresentadas neste trabalho.

Verificou-se a validade dos resultados obtidos, fazendo uma comparação dos valores obtidos, com valores conhecidos para situações específicas, através de outros métodos de cálculo. Verificou-se, deste modo, que a diferença associada aos resultados obtidos pelo modelo matemático é de 5,5%. A diferença obtida é aceitável para este tipo de projectos, e está dentro do que era expectável aquando do inicio deste trabalho.

Conseguiu-se observar uma relação directa entre o valor da áreas de colectores solares e o valor da fracção solar, sendo que quanto maior é a área do colector maior é também a fracção solar. Também o número de habitantes impar, por norma penaliza a situação económica do projecto, uma vez que é necessária a colocação de mais m^2 de área de colector do que aqueles que verdadeiramente são precisos, uma vez que a grande maioria dos colectores existentes no mercado têm sensivelmente $2m^2$ de área.

Conclui-se também que o preço da energia do sistema de apoio é um factor muito importante para a avaliação económica deste tipo de sistemas, e que por si só, é decisivo para a viabilidade ou inviabilidade deste tipo de projectos. Assim quanto mais elevado for o preço dos combustíveis fósseis, maior será a viabilidade dos investimentos em sistemas solares térmicos. Também foi possível verificar que a temperatura da água de utilização, bem como o volume do depósito influenciam fortemente a fracção solar deste tipo de sistemas. Foi também verificado, que o número de habitantes do imóvel influencia o valor da fracção solar.

7.2 Trabalho Futuro

No seguimento do trabalho apresentado, pretende-se dar continuidade ao nível do código computacional, *SolarEnergy*, completando factores importantes para o dimensionamento, avaliação de desempenho e avaliação económica dos sistemas solares térmicos. Pretende-se introduzir no programa a situação do sector industrial e dos

serviços, para que também nestes sectores se possa realizar um dimensionamento de sistemas solares ao abrigo da legislação em vigor de um modo rápido e eficaz.

Pretende-se também desenvolver a parte da *Optimização* que tem como objectivo optimizar o dimensionamento feito para o sistema solar, fazendo a correcções ou ajustes em diversas situações tais como; em que exista desperdício de energia solar, a fracção solar é muito reduzida ou ainda quando o *PayBack* é muito elevado.

Irá ainda ser feito um trabalho matemático muito ambicioso debruçado nas equações matemáticas desenvolvidas de modo a conseguir uma maior simplificação das mesmas, através de novas relações entre os diversos factores envolvidos. Nestas pretende-se também que o erro de aproximação aos gráficos e tabelas considerados seja menor.

Bibliografia:

T. Tomson, 2008, Discrete two-positional tracking of solar collectors, Renewable Energy 33, 400–405

C.A. Estrada et al, 2007, Heat transfer analysis in a calorimeter for concentrated solar radiation measurements, Solar Energy 81, 1306–1313

A. Borges, 2009, Energia Solar, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real

V. Trillat-Berdal et al, 2007, Coupling of geothermal heat pumps with thermal solar collectors, Applied Thermal Engineering, 1750–1755

Afonso C., "Refrigeração", FEUP, 1990;

Yunus A. Çengel et al, 2001 "Termodinâmica", terceira edição, Mc Graw Hill.

Collares-Pereira, Manuel, "Energias Renováveis, a opção inadiável", Sociedade Portuguesa de Energia Solar, Lisboa, 1998.

Decreto-Lei 78/2006, 2006, "Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edificios (SCE)".

Decreto-Lei 79/2006, 2006, "Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE)".

Decreto-Lei 80/2006, 2006, "Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE)".

Duffie, J. e Backman, W., 1991, "Solar Engineering of Thermal Processes", John Wiley & Sons Second Edition

Incropera, Frank P. e DeWitt, David P., 2002, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Fifth Edition.

International Energy Agency (IEA), 2007, "World Energy Outlook 2007"

Weiss, W., Bergmann, I., Fainger, G., 2008, "Solar Heat Worldwide", International Energy Agency (IEA).

Webgrafia

www.adene.pt

www.spes.pt

www.aguaquentesolar.com

www.eia.doe.gov

www.geocities.com

www.buildinggreen.com

http://valeemartins.no.sapo.pt

www.edprenovaveis.com

www.solarpaces.org